



KATHOLISCHE UNIVERSITÄT
EICHSTÄTT-INGOLSTADT

Fluviale Morphodynamik und eigendynamische Entwicklung

*Untersuchungen an einem naturnahen Umgehungsbach im Auwald zwischen
Neuburg und Ingolstadt*

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Mathematisch-Geographischen Fakultät
der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt

vorgelegt von

Dipl. Geograph Peter Fischer

Eichstätt 2016



Eingereicht am: 18-01-2016

Tag der mündlichen Prüfung: 25-04-2016

Gutachter

Referent: Prof. Dr. Bernd Cyffka

Korreferent: Prof. Dr. Michael Becht

Vorwort

Auch wenn sie nur von einer Person eingereicht wird, entsteht eine Arbeit, wie die vorliegende, erst durch das Zusammenwirken und die langjährige Unterstützung vieler Personen. Während ich gegraben, gebaut, installiert, dann gelesen, beobachtet, gemessen, ausgewertet und ausprobiert habe, dann nochmal gelesen und letztendlich geschrieben habe, haben mich viele begleitet. Nicht alle können namentlich Erwähnung finden, dennoch möchte ich mich an dieser Stelle bedanken und einzelne aufgrund ihrer besonderen Beteiligung nennen.

An erster Stelle steht hier mein Doktorvater, Prof. Dr. Bernd Cyffka. Er hat mich bereits Anfang 2009 in die südlichen Donauauen geschickt, um Biberspuren zu kartieren, keinesfalls aber „im Wald“ stehen lassen, sondern mich noch vor Abschluss des Werkvertrages direkt in das Projekt der Dynamisierung und dem damit eng verbundenen Monitoringprojekt „Monitoring auenökologischer Prozesse und Renaturierungsmaßnahmen“ als Mitarbeiter bzw. Doktorand übernommen.

An dieser Stelle sei auch gleich dem Förderer, dem Bundesamt für Naturschutz, und den Antragstellern des Projektes, sowie dem Landeigentümer, dem Wittelsbacher Ausgleichsfonds, gedankt.

Die Möglichkeit, hier zu forschen und zu promovieren, ist nach wie vor ein Glücksfall, für alle, die Freude und Begeisterung an fluvial-morphologischen Prozessen und von Flüssen geprägten Landschaften haben.

Ich danke Prof. Dr. Bernd Cyffka, dem Leiter des Aueninstitutes Neuburg und Inhaber der Professur für Angewandte Physische Geographie an der KU Eichstätt-Ingolstadt, vor allem für sein Vertrauen in mich. Neben der Forschungstätigkeit gab er mir die Möglichkeit, mich in die Lehre an der KU Eichstätt-Ingolstadt einzubringen und auf internationalen Tagungen Erfahrungen zu sammeln. Während der letzten sechs Jahre hat er mir alle Freiheiten gewährt, eigene Ideen zu verwirklichen, und hatte immer eine Lösung für meine Probleme.

An zweiter Stelle gebührt Prof. Dr. Michael Becht, Lehrstuhlinhaber für Physische Geographie an der KU Eichstätt-Ingolstadt, Dank. Zum einen für die Übernahme des Koreferats und die immer offene Tür, zum anderen für die Unterstützung in meinem Promotionsvorhaben, indem er mir immer den Zugang zu Geräten und die Integration in seine Arbeitsgruppe ermöglichte.

In dieser Arbeitsgruppe in Eichstätt und in den acht Teilprojekten des Monitoringprojektes arbeiten und arbeiteten viele Kollegen, die ich so näher kennen- und wertschätzen gelernt habe, aus manchen sind heute Freunde geworden.

Ich danke allen für die Begleitung während dieser Zeit:

- den (schon inzwischen eine ganze Weile bzw. fest angestellten) Eichstätter Geographen PD Dr. Martin Trappe, PD Dr. Tobias Heckmann und AR Dr. Florian Haas nachträglich für die gute und immer besser werdende Ausbildung am Standort. Dr. Florian Haas möchte ich für die Einführung in das Aueninstitut sowie in die Methode des Laserscannings danken, besonders dafür, dass er mir die Möglichkeit gab, zu Beginn auf seinen Exkursionen und Geländeseminaren wertvolle Erfahrungen zu sammeln.
- den (ehemaligen) Eichstätter Geographen: Anke und Christian Breitung, Thomas Fischer, Dr. Markus Thiel und Dr. Kathrin Umstädter für die gemeinsamen Treffen (die hoffentlich weiter stattfinden).
- In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch besonders bei Familie Gegg für die Gastfreundschaft und bei Dr. Andreas Gegg und Katharina Gegg für die danach stattfindenden mathematisch-statistischen Gesprächsrunden bedanken.
- den (noch in Projekten angestellten) Eichstätter Geographen Jana Dusik, Ludwig Hilger und Fabian Neugirg, sowie allen weiteren Mitarbeitern für die alltäglichen Gespräche während dem Mensamittagstisch.

- Max Weißbrod, Markus Kilg und dem Team der Fischbiologie, Dr. Joachim Pander und Dr. Melanie Müller, für das gegenseitige Beschnuppern der Methoden im Wald und die Diskussion bei den zahlreichen projektbegleitenden Arbeitsgruppentreffen.
- Bei André Schwab und Dr. Petra Lang möchte ich an dieser Stelle für die sehr gute Zusammenarbeit auch über das Projekt hinaus bedanken.
- Auch für die gute Zusammenarbeit auf vielfältigste Weise möchte ich mich bei Daniela Hirsch, Reinhard Geißler und Johann Gesell bedanken.

Ich danke meinen lieben Mitarbeiterinnen im Aueninstitut: Michaela Walter-Rückel u. a. für die Durchsicht der Zusammenfassung und englischen Übersetzung. Dr. Barbara Stammel möchte ich für das kritische Korrekturlesen des NaBiV-Heftes (Abschlussbericht des Monitoringprojektes) danken, was für meine künftige wissenschaftliche Arbeit sehr hilfreich und wertvoll und damit auch für das gute Gelingen der vorliegenden Arbeit ganz wesentlich war. Dr. Barbara Stammel und Marion Gelhaus für die vielen guten Diskussionen und die fachlichen „Wald- und Wiesengespräche“. Allen „AueninstitutlerInnen“ möchte ich für das ausgesprochen lebenswerte und freundschaftliche Arbeitsklima, welches mich während der Jahre immer wieder motiviert hat, danken.

Nicht vergessen seien die zahlreichen Praktikanten des Aueninstitutes, stellv. für alle seien hier Josef Adelkofer und Johannes Grauvogel genannt, die durch ihren Einsatz, auch nach Dienstschluss, mit mir oder eigenständig weiter Daten erhoben haben. Allen sei gedankt, dass weder Mückenstiche, Regen, Schnee oder Eis, noch vollgelaufene Wathosen die Freude an der Arbeit trüben konnten.

Dank geht auch an meine drei Hiwis, die mich auch nach Ausgabe aller verfügbaren Personalmittel noch weiter unterstützten: Martin Kuba, Manuel Stark und Constantin Stocker. Alle konnten offensichtlich ihre Begeisterung für die physische Geographie ausbauen, da sie jetzt selbst kurz vor dem Abschluss der Promotion bzw. dem Master of Science stehen.

Besonderer Dank soll auch an das Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt gerichtet werden. Neben anderen haben besonders Dr. Benno Kügel und Herr Thomas Zapf mich immer unterstützt und zum Erfolg beigetragen, indem sie meine Fragen beantwortet und mich mit aktuellen Daten versorgt haben. Auch Herrn Hans-Peter Pöckl, dem Leiter der Zentralwarte E.ON Wasserkraft AG, sei an dieser Stelle gedankt, da ich über ihn Zugang zu ergänzenden Datenreihen erhalten habe.

Claudia Pietsch danke ich für all die schönen Karten und die gelungene Umsetzung von mehreren schematischen Zeichnungen.

Für das zeitintensive Korrekturlesen mit anschließender (manchmal heißer) Diskussion danke ich meiner ehemaligen Kollegin Dr. Kathrin Umstädter und meinem „geographisch unbelasteten“ Freund Bernd Koslitz. Für die finale Durchsicht danke ich Monika Schmitz.

Meinen Freundinnen und Freunden, bei denen ich mich während dieser Jahre nicht habe blicken lassen, und allen die mich im Auwald begleitet haben, sei für ihr Verständnis gedankt.

Schlussendlich möchte ich mich bei meiner Partnerin Dr. Kathrin Umstädter bedanken, die mich bei entscheidenden Wendepunkten letztendlich doch immer richtig abbiegen ließ, mich mit Rat und Tat unterstützte und auf vielen weiteren Wegen zur Fertigstellung dieser Arbeit beitrug; insbesondere für ihre Geduld und Nachsicht, besonders im letzten Jahr, und für das „mich Aushalten“ während intensiver Arbeitsphasen.

Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurden die wesentlichen abiotischen Parameter, Prozesse und Strukturen in den Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt und dem hier als Umgehungsgewässer angelegten Ottheinrichbach erfasst. Ziel war es, die Hydro- und Morphodynamik in Fluss und Aue, ausgelöst durch die umgesetzten Renaturierungsmaßnahmen, zu untersuchen. Hierzu wurde eine Kombination aus unterschiedlichen Methoden gewählt, um die raum-zeitlichen Veränderungen am Fließgewässer umfassend zu dokumentieren.

Um die hydrologischen Prozesse (vertikale Wasserstandsschwankungen und horizontale Ausbreitung des Wassers) zu erfassen, wurde neben anderen Arbeiten ein Pegelnetzwerk aus permanenten, automatisch aufzeichnenden Pegeln und mobilen, nur temporär verwendeten Pegeln aufgebaut. Abflussmessungen und die Kartierung der Überflutungsflächen vervollständigten das hydrologische Messprogramm. Zur Erfassung der morphologischen Veränderungen (Umlagerungsprozesse im Gewässerbett und eigendynamische Laufverlagerung) wurden eine Vielzahl an unterschiedlichen Geräten eingesetzt und Messungen und Analysen durchgeführt. Mit einem terrestrischen Laserscanner, mit dem Oberflächenhöhenmodelle unterschiedlicher Fließgewässerabschnitte erstellt wurden, konnten Veränderungen detektiert werden. Ergänzend erfolgten im Überwasserbereich UAV-Aufnahmen sowie diverse Kartierungen. Zusätzlich wurden für den Unterwasserbereich zahlreiche Querprofile vermessen.

Seit Juni 2010 wird der Ottheinrichbach permanent mit einer an den Donaudurchfluss angepassten Wassermenge beschickt und es konnten 13 Ökologische Flutungen durchgeführt werden. Je nach Ausleitungsmenge werden verschiedene „Wasserkörper“ (Grundwasser, div. Auengewässer) aktiviert. Jahren mit geringeren Durchflüssen steht auch ein Jahr mit einem zehnjährlichen Hochwasserereignis gegenüber.

Die Wasserstandsschwankungen nehmen unter gesteuerten Bedingungen im rund 8 km langen Verlauf des Ottheinrichbachs ab. Bei natürlichen Hochwassern sind die größten Schwankungen an der Mündung zu finden. Dies hängt einerseits mit den standortspezifischen Verhältnissen (hydrologische Anbindung), sowie andererseits mit den besonderen Rückstauprozessen im Projektgebiet zusammen.

Über die Analyse der Ganglinienverläufe entlang des Umgehungsgewässers lassen sich drei wesentliche Erkenntnisse ableiten:

- Die hydrologische Konnektivität zwischen Donau und Aue wurde über diese Wiederanbindung und Reaktivierung alter Flutrinnen teilweise wieder hergestellt.
- Ein Anstieg des Wasserspiegels (Grund- und Oberflächengewässer) sowie eine deutliche Dynamisierung der Wasserstände konnte nachgewiesen werden.
- Eine Kombination der Maßnahmen (Ottheinrichbach, Ökologische Flutung und Grundwasserabsenkung) und ihre Durchführung führt zu noch mehr Dynamik in den Wasserständen als eine Maßnahme alleine und zu veränderten standörtlichen Verhältnissen als kleine und mittlere Hochwasser ohne Steuerung.

Detailbetrachtungen von Datenreihen lieferten die Erkenntnis, dass der Pegelstand nach Erreichen eines mehr oder weniger konstanten Höchststandes aufgrund der maximal zur Verfügung stehenden Ausleitungsmenge von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ Wassermenge unabhängig von der Dauer einer ÖF nicht mehr weiter zunimmt. Deutlich ist bei allen Pegeln der Unterschied zwischen einem natürlichen Hochwasser und einer gesteuerten Flutung zu sehen. Dabei ist besonders bei ÖF ein Unterschied zwischen einzelnen Pegelstandorten nachzuweisen. Die Ausbreitung der Flutungsflächen wird durch Rückstauprozesse, maßgeblich durch hohe Wasserstände in der Donau bedingt, entscheidend beeinflusst. Die Ausdehnung der tatsächlich überfluteten kartierten Bereiche bleibt dabei jedoch deutlich hinter den über Modelle prognostizierten Überschwemmungsflächen zurück. Insgesamt hat sich durch die Renaturierung die Fläche, die bei Hochwasserereignissen überflutet wird, deutlich vergrößert, und eine Verbesserung hin zu hydrodynamischen Standortverhältnissen konnte erreicht werden.

Umlagerungsprozesse wurden durch die Kartierung der Gewässerstrukturelemente erfasst. Damit konnte einerseits eine Differenzierung bestehender und andererseits eine Entwicklung von neuen Habitaten festgestellt werden. Totholzelemente haben sich dabei als wesentliche Strukturbildner herausgestellt. Manche Totholzansammlungen führen zur Ausbildung von Kolken und verändern die Tiefenvariabilität im Längsprofil der Gewässersohle. Über verschiedene Kartierungen wurde die Abfolge von Riffle-Pool-Strukturen erfasst und mit Angaben aus der Literatur verglichen. Dabei zeigten sich Abweichungen vom theoretisch-natürlichen Abstand, der meist mit dem 5 bis 7fachen der Gerinnebreite angegeben wird.

Die Auswertungen der Querprofilvermessungen zeigen eine sehr unterschiedliche „Entwicklungsfreudigkeit“ an den einzelnen Standorten. Das Flussbett unterliegt infolge dynamisierter Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten einer ständigen Veränderung. Neben der Breiten- ist auch die Tiefenvariabilität sowohl in den einzelnen Querprofilen als auch im gesamten untersuchten Abschnitt sehr hoch. Nicht immer folgt einer Breitenveränderung (Aufweitung) auch eine Veränderung in der Tiefe, d.h. auch bei großen Tiefen können sehr breite Stellen vorkommen.

Zusammenfassend können aus den Detailbetrachtungen und Ergebnissen der Aufnahmen mit einem terrestrischen Laserscanner verschiedene Einzelprozesse herausgefiltert werden. An sechs untersuchten Standorten wurden aufgrund weiterer Einflussfaktoren (Vegetation, Substrat-zusammensetzung etc.) verschiedene Prozesse beobachtet.

Bemerkenswert ist die für manche Standorte extrem schnelle Entwicklung von diversen Bankstrukturen, insbesondere im ersten Jahr der Beobachtung, es kann daher von verschiedenen Aktivitätsphasen gesprochen werden. Aufgrund der das ganze System betreffenden Sedimentlimitation wurde an manchen Standorten bereits ein klimaxähnliches Stadium erreicht. Die Ausbildung der Form ist weitgehend abgeschlossen und Veränderungen sind jetzt nur noch kleinräumig und im cm-Bereich zu detektieren. An diesen oder ähnlichen Standorten kann auch durch ÖF die morphologische Aktivität nicht mehr wesentlich gesteigert werden. An anderen Standorten kam es schon vor der ersten

Wassereinleitung zu Abbrüchen an den naturnah angelegten Prallhängen. Verantwortlich dafür, aber auch für weitere Überformung, waren hier allerdings nicht die maximalen Abflüsse während einer ÖF, sondern die bettbildenden Abflüsse im OHB.

Die wichtigste Voraussetzung für ein funktionstüchtiges Fließgewässer wurde durch die Dynamisierungsmaßnahmen (Dotierung des Umgehungsbaues, Steuerung bei einer Ökologischen Flutung und Umsetzung der Grundwasserabsenkung) geschaffen und bleibt bestehen: Raum für eigendynamische Gewässerentwicklung. Das naturnahe Umgehungs-gewässer im Projektgebiet wird sich – wie es Fließgewässer eben tun – eigendynamisch weiterentwickeln. Ein Rest an Naturferne wird allein durch die veränderten Abflüsse, den stark veränderten und limitierten Sedimenttransport und die verschiedenen Nutzungsinteressen immer vorhanden bleiben.

Wenn die Rahmenbedingungen (insbesondere die Ausleitungsmengen) nicht geändert werden, kann es nur zu einer Ausbildung einer Sekundäraue auf sehr begrenzten Flächen kommen. Das geschieht allerdings auf einem tieferen Niveau, bezogen auf die umgebende Donauaue. Die Überflutungsdynamik bleibt damit weiterhin stark vermindert und kann sich nur in der von der Ausleitungsmenge vorgegebenen Spannweite abspielen. Die Ottheinrich-bachaue könnte so nur innerhalb des ihr zugestandenen Entwicklungskorridors für autotypische Pflanzen und Tiere einen Lebensraum mit den hydromorphologischen Funktionen übernehmen.

Die Untersuchungsergebnisse des großen Freilandexperiments „Dynamisierung der Donauauen“ zeigen, wie stark die Prozesse, welche die Entwicklung der Donauauen maßgeblich mitbeeinflussen, von der Steuerung und Durchführung der einzelnen Dynamisierungsmaßnahmen abhängen. Die Entwicklungen laufen dabei mit ausgeprägten räumlichen und zeitlichen Unterschieden ab und dürfen nicht pauschalisiert auf das ganze Auensystem übertragen werden.

Die Anlage eines naturnahen Fließgewässersystems mit technisch gesteuerten Abflussschwankungen reicht deshalb noch nicht aus, um Auen ausreichend zu dynamisieren! Naturnaher Wasserbau, begrenzt auf das Anlegen von naturnahen Formen (Prallhänge, Kiesbänke, Totholzstrukturen) ist nicht ausreichend, um Flusslandschaften zu reaktivieren. Vielmehr müssen die dynamischen Prozesse maximal gefördert werden, die zu der Entstehung von Strukturen führen.

Summary

For the purposes of this study, the essential abiotic parameters, processes and structures of the Danube floodplains were recorded between Neuburg a. D. and Ingolstadt. The Ottheinrichbach, a newly created bypass stream located in the same area, was also covered by the research. Aim of this study was to investigate and determine river and floodplain dynamics triggered by implemented restoration measures.

A combination of methods was used in order to accurately document spatiotemporal changes. Hydrologic investigations were carried out through gauging stations, which were widely dispersed in the project area. Both permanent and mobile gauges were used to record vertical water level variations; discharge measurements were also performed. Inundation areas were mapped in order to complete the hydrologic measuring programme and to detect the lateral spread of water.

A wide variety of tools were used to document the morphological changes – the sediment shifting processes in the channel and self-dynamic development of the water course. Channel reaches were surveyed using a terrestrial laser scanner, generating digital elevation models (DEM). Producing a DEM of Difference (DoD) involves quantifying volumetric changes between consecutive topographic surveys. In addition, UAVs were used in order to generate images of subaerial conditions. Bathymetric and further stream bank data was collected through cross sectional measurements.

Since June 2010 a controlled discharge of water, adapted to mirror the discharge levels of the Danube River, has been led through the Ottheinrichbach to improve river continuum and flood plain dynamics. Thirteen controlled flooding events were carried out since then and hydrological impact was well documented. According to the amount of water, different water bodies (ground water, diverse floodplain water bodies) became active. Within the research time frame a ten-year flood event occurred.

Under controlled conditions, the water level fluctuations decreased along the 8km water course. During natural flood events, the highest variations occur at the river mouth. This is a result of the specific conditions at the river mouth (hydrologic connectivity), as well as the special back water processes in the project area.

Analysis of the hydrographs along the channel leads to three essential findings:

- The hydrologic connectivity between the Danube and its floodplain was partially restored by reconnecting oxbow lakes and reactivating old flood channels;
- An increase of the water table (both groundwater and surface waters) as well as a clear dynamisation of water levels could be proved;
- Combined measures (stream bypass, controlled flooding and ground water drawdown) lead to greater dynamism in the fluctuations of water levels than one measure can achieve alone – or even that are seen following small and medium sized floods.

A detailed analysis of the time series showed that water levels no longer increase. One reason for this is the limited water volume ($30 \text{ m}^3/\text{s}$), which is more or less constant

regardless of the duration of a flood event. The hydrographs clearly show the differences between a natural and a controlled flood event and locational differences of the gauges being particularly noticeable during controlled flooding events.

The extension of the inundation area within the current structural design is influenced by back water processes, especially the high water levels of the Danube. Mapping of the actually inundated areas did not meet with expectations; only slightly more than half of the expected area was in fact inundated. Nevertheless, an increase has been seen in flooded or wetted areas and improvements towards hydromorpho-dynamically active patches were achieved through the restoration measures implemented.

Sediment shifting processes in the newly created stream courses were measured by mapping in-stream structures. Both a differentiation and a development of new habitats could be ascertained. Deadwood elements have proven essential to increasing the structural variety of the river, aggregations in some cases leading to pool formations which changed the depth variability along the riverbed. Surveying and mapping measures to obtain detailed channel morphology included riffle-pool sequences and other bedform data. They show a deviation from the theorised natural distance, which commonly occur at intervals of from 5 to 7 stream widths.

Cross sectional analysis shows a considerably different morphodynamic development at the measured sites. The dynamic runoff and varying flow directions cause erosion and sedimentation along the water course, thereby causing continuous alteration to the river space. In addition to width variability, the depth variability is also high in the single cross section, as well as throughout the whole section of river reach examined. A change in width (river widening) is not always followed by a change in depth, i.e. deep sections can also be found at wide stream sections.

Finally, a terrestrial laser scanner was used in order to filter out the sub processes from the surveys conducted. At six of the locations examined, different processes were observed due to further influencing factors (vegetation, substrates, etc). Noteworthy among these processes is that numerous locations showed a rapid development particularly in the early stages of observation. Various bank structures were created during that time, occurring in several activity phases.

Due to the sediment limitation which affects more or less the whole system, a stage similar to climax was already achieved in some locations. Both the positioning and detailed design of these specific areas is complete, therefore only small scale changes are now taking place – with a detection limit around the cm-range. At these or similar locations, the morphological activity can no longer be increased through controlled floodings.

At other sites, mass wasting of the near-natural modelled cut-off banks occurred even before the first water flow into the channel. Additional morphological changes are the result not of maximum discharge during flood events, but of the bankfull discharge.

The most important requirement for functionally flowing water is space for self-dynamic development. The semi-natural bypass acts just like a natural river, shifting its course and bringing with it an irreversible restructuring. Nevertheless, the man-made status will always

remain, shown for example in an unnatural runoff, strongly changed and limited sediment transport rates, and the different uses it is put to.

If framework conditions are not adjusted (in particular the volume of discharge), a development of a secondary floodplain with only very limited space will occur. A secondary floodplain will only occur at a topography lower than the Danube floodplain. The inundation dynamic remains strongly reduced and is determined by the controlled discharge volume. This newly created floodplain will develop habitats with hydro-morphological dynamics for typical floodplain species of flora and fauna in the current development band.

The results of the unique field experiment „Dynamic Development of the Danube Floodplain“ show how strongly processes are influenced by the management and realisation of a single restoration measure (discharge regulation of a permanent bypass river, management of sluices for the controlled flood event, or the performance of groundwater drawdown). These manifold and complex processes are crucial for a near-natural floodplain development.

Nature-orientated hydraulic engineering, limited to the creation of undercut slopes, gravel bars and dead wood structures is not enough to revitalise such ecosystems. Rather, the dynamic processes and the driving forces leading to these structures must be promoted. Therefore a new bypass system with man-made discharge variations is not enough to successfully restore a floodplain.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation und Relevanz	1
1.2	MONDAU	4
1.3	Auen und Renaturierung: Begriffe und Erläuterungen	5
1.3.1	Allgemeines	5
1.3.2	Abgrenzung des Auenbegriffs	8
1.3.3	Renaturierung – zurück zur Natur	14
1.3.4	Leitbild und Entwicklungsziele bei (und für das) Renaturierungsvorhaben	18
1.3.5	Renaturierungsprojekte und Monitoring	20
1.3.6	Anlage von naturnahen Umgehungsgewässern	21
2.	THEORIEN, MODELLE UND METHODEN DER FLUVIALMORPHOLOGIE	24
2.1	Das fluviale System	24
2.2	Fließgewässerökologische Konzepte	30
2.3	Ausgewählte Aspekte zur Fluvialmorphologie	32
2.3.1	Die Geschichte der Fließgewässerforschung	32
2.3.2	Gerinnegrundrissformen	33
2.3.3	Natürliche Gerinnebildung und Gleichgewichtsbreite	34
2.3.4	Mechanismen der Ufererosion	36
2.3.5	Seitenerosion in sand- und kiesführenden Flüssen	38
2.3.6	Sohlstrukturen	39
2.4	Terrestrisches Laserscanning bei fluvial-morphologischen Fragestellungen	41
3.	FORSCHUNGSBEDARF	47
3.1	Fragestellung	47
3.2	Zielsetzung	48
3.3	Methodik und Untersuchungsprogramm	53
4.	DIE DONAUAUEN ZWISCHEN NEUBURG UND INGOLSTADT	58
4.1	Naturräumlicher Überblick und geographische Abgrenzung des Projekt- und Untersuchungsgebietes	58
4.1.1	Entstehung und Wandel der Donau-Auen-Flusslandschaft im Quartär	59
4.1.1.1	Flusslaufverlagerung ins Untersuchungsgebiet	59
4.1.1.2	Postglaziale Flusssdynamik (Holozän) und anthropogene Flussbaumaßnahmen	62
4.1.1.3	Sedimenttransport und Auenrelief	64

4.1.2	Geologie und Boden	67
4.1.2.1.	Geologischer Untergrund.....	67
4.1.2.2.	Postglaziale Terrassenkörper und Überflutungsflächen	68
4.1.2.3.	Böden.....	70
4.1.3	Gewässer	71
4.1.3.1.	Abflussregime der Donau	71
4.1.3.2.	Weitere Oberflächenwasserkörper.....	74
4.1.3.3.	Grundwasser	75
4.1.4	Klima	77
4.1.5	Vegetation und Landnutzung	79
4.1.6	Besitzverhältnisse und Schutzstatus.....	79
4.2	Dynamisierungsmaßnahmen	80
4.2.1	Maßnahmen zur Dynamisierung und ihre Steuerung	80
4.2.1.1.	Umgehungsgewässer	80
4.2.1.2.	Ökologische Flutung	85
4.2.1.3.	Grundwasserabsenkung.....	87
4.2.2	Projektspezifische Details	88
4.3	Das Untersuchungsgebiet – Standorte	89
5.	METHODEN ZUR ERFASSUNG ABIOTISCHER PARAMETER, PROZESSE UND STRUKTUREN	95
5.1	Hydrologische Arbeiten.....	95
5.1.1	Instrumentierung des Untersuchungsgebietes, Datenerfassung und hydrologische Untersuchungen.....	95
5.1.1.1.	Pegelsysteme und Messung des Wasserstandes.....	95
5.1.1.2.	Fließgeschwindigkeit und Durchflussmessung.....	99
5.1.1.3.	Abfluss- und Wasserstandsdaten von externen Datenquellen	100
5.1.1.4.	Wasserspiegelberechnung, Grundwassermodellierung, Luftbilder und andere Planungsunterlagen.....	101
5.1.1.5.	Kartierung von Überflutungsflächen und Wasserwechselzonen.....	102
5.1.2	Auswertung, Berechnung und Analyse hydrologischer Daten	105
5.1.2.1.	Methodik und statistische Verfahren	105
5.1.2.2.	Berechnung von hydraulischen Parametern	107
5.2	Methoden zur fluvial-geomorphologischen Aufnahme	110
5.2.1	Berechnungen zur morphologischen Typisierung	110
5.2.2	Gewässerstrukturkartierung.....	115

5.2.2.1. Kartierung von Strukturelementen	115
5.2.2.2. Alternative Methode: UAV-Befliegung.....	116
5.2.2.3. Vermessung von Riffles und Pools	118
5.2.3 Querprofilvermessung	121
5.2.3.1. Feldarbeiten	121
5.2.3.2. Auswertung	123
5.2.4 Terrestrisches Laserscanning	127
5.2.4.1. Gerät und Feldarbeiten.....	127
5.2.4.2. Datenaufbereitung und verwendete Software (Postprocessing).....	131
5.2.4.3. Datenanalyse und Auswertung (Verarbeitung von Laserpunkten).....	137
5.2.4.4. Alternative Methode: DGM Erstellung durch UAV-Befliegung	144
5.3 Zusammenfassung – der „dynamische Methodenmix“	145
6. ERGEBNISSE	147
6.1 Hydrologische Untersuchungen.....	147
6.1.1 Wasserstandsmessungen und Ganglinienanalyse.....	147
6.1.1.1. Ausgewählte hydrologische Ereignisse.....	147
6.1.1.2. Donau.....	148
6.1.1.3. Ottheinrichbach	154
6.1.1.4. Längenmühlbach	169
6.1.1.5. Zeller Kanal	171
6.1.1.6. Weitere Auengewässer und Rückstaubereiche des OHB	171
6.1.2 Überflutungsflächen und Wasserwechselzonen.....	174
6.1.3 Abflussdynamik und weitere hydrologische Parameter	179
6.1.4 Zusammenfassung	181
6.2 Fluvial-Morphologische Untersuchungen.....	183
6.2.1 Morphologische Typisierung	183
6.2.2 Gewässerstrukturkartierung.....	186
6.2.2.1. Kartierung von Strukturelementen (Totholz)	186
6.2.2.2. Fallbeispiel: UAV-Befliegung (Teil A).....	189
6.2.2.3. Vermessung von Riffles und Pools	191
6.2.3 Querprofilvermessung	192
6.2.4 Terrestrisches Laserscanning.....	206
6.2.4.1. Komplettaufnahme des Umgehungsgerinnes	206
6.2.4.2. Scanstandorte	210
6.2.4.2.1. Allgemeines und wesentliche Einflussfaktoren	210

6.2.4.2.2. „Trogbrücke“	214
6.2.4.2.3. „Radwegbrücke“	224
6.2.4.2.4. „Wegekreuzung“	228
6.2.4.2.5. „Prallhang am QP 17-20“	234
6.2.4.2.6. „Wetterloch“	237
6.2.4.2.7. „1. Rückleitung-Prallhang“	242
6.2.4.2.8. „1. Rückleitung-Fließgewässerstrecke“	249
6.2.5 Fallbeispiel: UAV-Befliegung (Teil B)	251
6.2.6 Zusammenfassung	253
7. DISKUSSION	256
7.1 Hydrologisches Verhalten	256
7.1.1 Wasserstand und Abfluss von Donau und Ottheinrichbach	256
7.1.2 Unterschiede zwischen Hochwasser und Ökologischer Flutung	261
7.1.3 Überflutungsflächen	263
7.2 Fluvial-Morphologische Betrachtungen	267
7.2.1 Totholz	268
7.2.2 Riffle-Pool-Abfolgen	269
7.2.3 Querprofilvermessung	270
7.2.4 Terrestrisches Laserscanning	272
7.2.4.1. Quantifizierung der Umlagerungsprozesse	272
7.2.4.2. Untersuchungen an anderen Flüssen	274
7.2.4.3. Unterschiede zwischen den Aufnahmen und den Standorten der eigenen Messung	276
7.3 Der dynamische Methodenmix auf dem Prüfstand	280
8. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	283
8.1 Bemerkungen zu den Dynamisierungsmaßnahmen und einzelnen Ökofaktoren	283
8.2 Schlussfolgerungen	287
8.3 Empfehlungen	290
8.3.1 Vorbemerkung	290
8.3.2 Umgehungsgewässer	290
8.3.3 Ökologische Flutung	291
8.3.4 Monitoring	293
8.3.5 Allgemeine Empfehlungen	294
9. FAZIT	295

10. LITERATURVERZEICHNIS.....	296
11. ANHANG	331

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Aufbau des E+E-Vorhabens MONDAU mit den acht Teilprojekten und den beteiligten Institutionen.....	5
Abb. 1-2: Abgrenzung unterschiedlicher Auentypen mit den jeweiligen Teileinheiten	11
Abb. 1-3: Schematische Darstellung ökologisch-morphologischer Teilräume im Querprofil der Fließgewässer (NIEHOFF 1996, S. 14).	13
Abb. 1-4: Entwicklungsziel zwischen den ökologischen Funktionen und Strukturen (ergänzt nach WOOLSEY et al. 2005, S. 22).	17
Abb. 1-5: Abiotische und biotische Charakteristika zur Erfassung der ökologischen Funktionsfähigkeit von Fließgewässern (REY 2004, S. 17).	22
Abb. 2-1: Gleichgewichtszustände in der Geomorphologie nach SCHUMM (1998 in HARNISCHMACHER 2002, S. 12).	24
Abb. 2-2: Stabile und instabile Gleichgewichtszustände (schematisch) nach KNIGHTON (1998 in HARNISCHMACHER 2002, S. 17).	25
Abb. 2-3: Gewässerstrukturen im Raum-Zeit-Bezug nach KERN (1994 in HARNISCHMACHER 2002, S. 10).	26
Abb. 2-4: Fluvialmorphologische Steuer- und Zielgrößen nach KNIGHTON (1998 in HARNISCHMACHER 2002, S. 7).	27
Abb. 2-5: Auen-Interaktion: Komponenten und Prozesse einer auentypischen Dynamik (FISCHER & CYFFKA 2013A, S. 43).	29
Abb. 2-6: Fluvial-geomorphologisches Kontrollsystem OHB, nach AHNERT (2003, S. 32) (gestrichelter Kasten), ergänzt und angepasst auf das Umgehungsgewässer (OHB) im Projektgebiet.	30
Abb. 2-7: Gerinnegrundriss und steuernde Prozessvariablen (HOUBEN 2002, S. 24, verändert nach SCHUMM 1985).	33
Abb. 2-8: Natürliche Gerinnebildung durch laterale Erosion (REQUENA 2008, S. 24).	35
Abb. 2-9: Konzept zur Mäanderentwicklung und Seitenerosion nach KELLER (1972 in BROWN 1997, S. 70).	36
Abb. 2-10: Gravitationsinduzierte Versagensformen an Ufern nach THORNE (1982 in REQUENA 2008, S. 44).	37
Abb. 2-11: Ausformung der Böschung in Abhängigkeit vom Ufermaterial nach SCHERLE (1999 in REQUENA 2008, S. 44).	38
Abb. 2-12: Anzahl fluvial geomorphologischer Veröffentlichungen in der Zeitschrift ESPL (Earth Surface Processes and Landforms) (STOTT 2013, S. 249).	42
Abb. 3-1: Die vier wesentlichen räumlich-zeitlich wirkenden Prozesse in Fließgewässern (PROMINSKI et al. 2012, S. 19).	49
Abb. 3-2: Maßstabsebenen im Fließgewässer und in Auen (schematisch) stark verändert nach (POOLE 2002), erweitert mit den im Teilprojekt II des Monitoring Projektes eingesetzten Methoden und Werkzeugen(FISCHER und CYFFKA in press).	54

Abb. 3-3: Arbeitsablauf zur Erfassung hydrologischer Prozesse.....	55
Abb. 3-4: Arbeitsablauf zur Erfassung morphologischer Prozesse.	56
Abb. 4-1: Übersicht über das Auwald-Gebiet, Luftbild (LDBV 2013).	58
Abb. 4-2: Übersicht über das Projekt- und Untersuchungsgebiet.....	59
Abb. 4-3: Paläogeographische Übersicht der pleistozänen und heutigen Flusssysteme in der Region (DOPPLER et al. 2002, S. 32).	61
Abb. 4-4: Fluviale Morphodynamik der rezenten Flussaue.	66
Abb. 4-5: N-S-Profil (schematisch) mit geologischem Aufbau im Projektgebiet (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B).	67
Abb. 4-6: Schematische Darstellung der Auenterrassen im Untersuchungsgebiet (leicht verändert) (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003A).....	68
Abb. 4-7: Ausschnitt aus der Geologischen Karte 7233 Neuburg (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003A).	70
Abb. 4-8: Durchfluss am Pegel Ingolstadt (Luitpoldstraße) von 1980 bis 2010 (Tagesmittelwerte, Daten WWA-Ingolstadt).....	72
Abb. 4-9: Grundwassermodellierung mit den in Abb. 4-10 dargestellten neun Grundwassermessstellen für den Monat Juli 2011, Quelle: Aueninstitut.	76
Abb. 4-10: Grundwassermessstellen (GWM 1 bis GWM 9) im Projektgebiet (FISCHER & CYFFKA 2014, S.174).	77
Abb. 4-11: Mittlerer Temperatur- und Niederschlagsverlauf für die Klimastation Karlshuld über den Zeitraum 1990-2013 (Daten LFL 2014).	78
Abb. 4-12: Ausleitungsbauwerk und erster Abschnitt des Ottheinrichbaches.....	80
Abb. 4-13: Einteilung des Ottheinrichbaches in seine sechs Abschnitte und Teilabschnitte, vorgenommen im Hinblick auf die natürlichen Bedingungen vor Baubeginn und die baulichen Maßnahmen.	85
Abb. 4-14: Ausleitungsbauwerk für Ökologische Flutungen.....	86
Abb. 4-15 Drosselbauwerk und aufgestauter Längenmühlbach.....	87
Abb. 4-16: Bauwerke für die Grundwasserabsenkung.....	88
Abb. 4-17: Auswahl der hydrologisch und morphologisch relevanten Bauwerke im Untersuchungsgebiet	90
Abb. 4-18: Standort an der „Trogbücke“.....	91
Abb. 4-19: Standort an der „Radwegbrücke“	92
Abb. 4-20: Standort an der „Wegekreuzung“	92
Abb. 4-21: Standort „Prallhang am Querprofil 17 bis 20“	93
Abb. 4-22: Standort am „Wetterloch“	93
Abb. 4-23: Standort an der „1. Rückleitung-Prallhang“.....	94
Abb. 5-1: Verschiedene Pegel am Ottheinrichbach.	96

Abb. 5-2: Lage der Pegelstandorte und Fließgewässer-Systeme im PG mit Pegelbezeichnung.	96
Abb. 5-3: Auengewässer nach AMOROS et al. (1987) mit begrifflicher Abgrenzung (POTTGIESSER & EHLERT (2012, S. 14).	98
Abb. 5-4: Auengewässer in „naturnahen Auen“ nach POTTGIESSER und EHLERT (2012, S. 15), verändert und ergänzt.	99
Abb. 5-5: Linienführung in Abhängigkeit von Gefälle und bordvollem Abfluss nach LEOPOLD und WOLMAN (1957 in MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980 in LFW 2005, S. 24).	111
Abb. 5-6: Maßbezeichnungen zur Linienführung nach DIN 4049 (MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980, S. 108).	113
Abb. 5-7: Abgrenzungskriterien nach DA SILVA (1991) und der Modifikation nach ZARN (1997) mit Beispielen charakteristischer Flussabschnitte (REQUENA 2008, S.31).	114
Abb. 5-8: Arbeitsablauf zur Bearbeitung der Luftbilder aus der UAV-Befliegung.	118
Abb. 5-9: Riffles und Pools im Neubauabschnitt des Ottheinrichbaches.	119
Abb. 5-10: Schema zur Bestimmung der Riffle-Pool-Abfolgen am Laufabschnitt des OHB zwischen 1.500 m und 1.700 m Flusslauf-Länge.	120
Abb. 5-11: Lage der Querprofile im Untersuchungsgebiet.	122
Abb. 5-12: Skizze zum Breiten-Tiefen-Verhältnis (HARNISCHMACHER 2002, S. 101).	124
Abb. 5-13: Skizze zur Bestimmung des bordvollen Niveaus und des Eintiefungsverhältnisses nach ROSGEN (1994, S.182, vgl. SCHERLE 1999, S. 2-37).	125
Abb. 5-14: Begriffe zur Beschreibung der Qualität von Messinformationen (KERN & BRUHN 2010, S. 4).	129
Abb. 5-15: Strahldivergenz, Spotgröße und Schrittweite (KERN 2003, S. 57).	129
Abb. 5-16: Arbeitsablauf zur Aufnahme und Weiterverarbeitung von TLS-Daten.	132
Abb. 5-17: Grobe manuelle Beschneidung von Punktwolken über Ebenen.	133
Abb. 5-18: Manuelle Beschneidung von Punktwolken zur Eliminierung von Vegetation und Wasserspiegelungen über 1-Meter-Bänder.	134
Abb. 5-19: Schematische Zeichnung zu den Höhenunterschieden bei DGM infolge der Umwandlung einer Punktwolke in ein Grid mithilfe des tiefsten Punktes einer Punktwolke oder des Mittelwerts innerhalb der einzelnen Gridzellen (UMSTÄDTER 2015, S. 67).	135
Abb. 5-20: Höhenmodell vom Teilabschnitt 1.2 mit gleichen Eingangsdaten, aber unterschiedlicher Wahl der Gridzellengröße.	136
Abb. 5-21: Entfernung der Rasterzellen mit Vegetation durch den <i>Progressive Morphological Filter</i>	137
Abb. 5-22: Histogramm (schematisch) eines Difference Grids mit Angabe des LoD und damit den Bereichen signifikanter Veränderung der Oberfläche (UMSTÄDTER 2015, S. 71).	140
Abb. 5-23: Veränderungsgrid von der Kiesbank an der „Trogbrücke“.	141

Abb. 5-24: Schema zu den vier unterschiedlichen Betrachtungsweisen bei TLS-Aufnahmen am Fließgewässer	144
Abb. 6.1-1: Tagesmittelwerte (A), Schwankungen der mittleren monatlichen Durchflüsse (B) und Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse (C) (Daten: Donau, Ingolstadt 1924 bis 2014, Quelle:LFU-GKD (2015)).	149
Abb. 6.1-2: Tagesmittelwerte (A), Schwankungen der mittleren monatlichen Durchflüsse (B) und Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse (C) (Daten: Donau, Ingolstadt 2010 bis 2013, Quelle: LFU-GKD (2015))......	151
Abb. 6.1-3: Mittlere Dauerlinie des Durchflusses (Überschreitungstage) mit oberer und unterer Hüllkurve (Daten: Donau, Ingolstadt 1924-2014, Quelle: LFU-GKD (2015)).....	152
Abb. 6.1-4: Dauerlinien der Überschreitungstage mit eingezeichneten Grenzlinien für 150 m ³ /s und 600 m ³ /s Durchfluss (Daten: Donau, Ingolstadt 2010-2014, Quelle: LFU-GKD (2015)).	153
Abb. 6.1-5: W-Q-Beziehung am Pegel P 01 „Trogbrücke“	155
Abb. 6.1-6: Tagesmittelwerte (A), Schwankungen der mittleren monatlichen Wasserstände (B) und Häufigkeitsverteilung einzelner Wasserstände (C) (OH B P 03, 2010 bis 2013).....	157
Abb. 6.1-7: Wasserstandsschwankungsamplituden (berechnet auf der Basis von Tagesmittelwerten) entlang des OH B während Hochwasser und ÖF an ausgewählten Pegelstandorten	158
Abb. 6.1-8: Box-Plot-Diagramme der stationären Fließgewässerpegel am OH B und Zeller Kanal sowie der beiden Stillgewässerpegel am Kleinen Schlossweiher und Albenschüttweiher	160
Abb. 6.1-9: Ganglinien der stationären (permanenten) Fließgewässerpegel (Tagesmittelwerte) am OH B und der Stillgewässerpegel am Kleinen Schlossweiher	161
Abb. 6.1-10: Ganglinien der temporären Pegel für den Zeitraum der siebten ÖF vom (23.12.2012 bis 31.12.2012).....	163
Abb. 6.1-11: Ganglinien der temporären Pegel für das Juni-Hochwasser 2013 und der zehnten ÖF aufgeteilt nach den charakteristischen Ganglinienverläufen und Fließgewässersystemen	168
Abb. 6.1-12: Ganglinien der stationären Pegel BG 19 und BG 20 für die zweite ÖF.....	169
Abb. 6.1-13: Ganglinien der temporären Pegel 2, 3 und 5 für die fünfte und sechste ÖF....	170
Abb. 6.1-14: Ausbreitungsrichtung von Wasser mit einer Wasserführung zwischen 2,0 m ³ /s und 3,0 m ³ /s..	172
Abb. 6.1-15: Ausbreitungsrichtung von Wasser kurz nach Beginn einer ÖF.	173
Abb. 6.1-16: Ausbreitungsrichtung von Wasser bei hohen Wasserständen der Donau und langer Dauer einer ÖF.....	174
Abb. 6.1-17: Überflutungsflächen der ÖF Stufe 1 bis 3, sowie die bis zum Durchlass am Pegel 19 kartierte Ausdehnung während des Juni-Hochwassers 2013 und die prognostizierten Überflutungsflächen (FISCHER und CYFFKA in press).	176

Abb. 6.1-18: Schematische Zeichnung des Wasserstandes bei entsprechender Durchflussmenge in der Donau und dessen Einfluss auf das Gesamtsystem.....	178
Abb. 6.2-1: Verlauf des OHB mit eingezeichneter Mäandergürtelbreite.	184
Abb. 6.2-2: Kornsummenlinie ausgewählter Messungen.	185
Abb. 6.2-3: Abgrenzungskriterien zur Gerinnemorphologie nach DA SILVA (1991) und der Modifikation nach ZARN (1997) mit den Daten aus der Querprofildatenbank für den Neubauabschnitt des OHB.	186
Abb. 6.2-4: Gegenüberstellung der beiden Kartierungen der Strukturelemente für den Fließgewässerabschnitt „Trogbrücke“-„Radbrücke“ 2010 und 2011 mit ausgewählten Gewässerstrukturelementen (verändert nach FISCHER und CYFFKA (in press).	189
Abb. 6.2-5: Totholzeintrag im OHB.....	189
Abb. 6.2-6: Vergleich der beiden Totholzkartierungen 2010 und 2011 im Bereich der Wegekreuzung.	190
Abb. 6.2-7: Totholzkartierung 2014 im Bereich der Wegekreuzung.....	190
Abb. 6.2-8: Vermessung der Riffle-Pool-Abfolgen innerhalb der Neubaustrecke..	192
Abb. 6.2-9: Entwicklung unterschiedlicher Querprofile.....	193
Abb. 6.2-10: Gerinnebreiten bei mittlerer Wasserführung (MW) und bordvollen Abflussbedingungen (BV) an 33 Querprofilen am OHB.	195
Abb. 6.2-11: Breiten-Tiefen-Verhältnis bordvoller Abflussbedingungen für die Aufnahme 5 an 33 Querprofilen am OHB.	196
Abb. 6.2-12: Breiten-Tiefen-Verhältnis bei mittlerer Wasserführung für die Aufnahme 5 an 33 Querprofilen am OHB.....	197
Abb. 6.2-13: Formfaktor nach FAHNESTOCK (1963) für die Querprofilaufnahmen 1 und 5 an 33 Querprofilen am OHB.	199
Abb. 6.2-14: Breiten- und Tiefen-Verhältnisse für die Querprofilaufnahme 5 an 33 Querprofilen am OHB.....	199
Abb. 6.2-15: Querprofil Kleiner Schlossweiher – Donau.	200
Abb. 6.2-16: Erosions- und Akkumulationsflächen an 33 Querprofilen am OHB.	201
Abb. 6.2-17: Veränderungen des QP 19 von der ersten bis zur fünften Aufnahme.....	202
Abb. 6.2-18: Zusammenhang zwischen maximaler Gerinnetiefe (T_{MAX}), der Gerinnebreite (B_{BV}) und der Querschnittsfläche (A_{BV}) mit der mittleren Gerinnetiefe bei bordvollen Abflussverhältnissen.	204
Abb. 6.2-19: Hangneigung der Ufer vom Abschnitt I („Radbrücke“ – „Wegekreuzung“), abgeleitet aus Laserscandaten.	207
Abb. 6.2-20: Gerinnetiefe zum umliegenden Auenniveau vom Abschnitt I („Radbrücke“ – „Wegekreuzung“), abgeleitet aus Laserscandaten.....	208
Abb. 6.2-21: Scanstandorte im Untersuchungsgebiet.	210

Abb. 6.2-22: Niederschlag über 30 mm am Tag an der Station Nassenfels (Daten DWD LFU-GKD 2015).	212
Abb. 6.2-23: Wasserstandsganglinie an der „Trogbücke“ mit eingezeichneten Zeitpunkten der TLS-Aufnahmen.	214
Abb. 6.2-24: Veränderungen der Oberfläche an der „Trogbücke“ vor Umbau (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis C, siehe Tab. 6.2-10).	215
Abb. 6.2-25: Veränderungen im Gerinnebett zwischen Aufnahme A→B.	216
Abb. 6.2-26: Veränderungen der Oberfläche an der „Trogbücke“ nach Umbau (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen C bis F, siehe Tab. 6.2-10).	219
Abb. 6.2-27: Veränderungen der Gerinneoberfläche an der „Trogbücke“ in 3D-Ansicht (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis F, siehe Tab. 6.2-10).	221
Abb. 6.2-28: Veränderungsgrids der Aufnahmen A→F an der „Trogbücke“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis F, siehe Tab. 6.2-10).	223
Abb. 6.2-29: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten der TLS-Aufnahmen.	225
Abb. 6.2-30: Veränderungen am „Prallhang 1“ an der „Radbrücke“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen, siehe Tab. 6.2-12).	226
Abb. 6.2-31: Veränderungen am Prallhang 1 an der „Radbrücke“ zwischen den Aufnahmen A→E in 3D-Ansicht (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen, siehe Tab. 6.2-12).	227
Abb. 6.2-32: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten der TLS-Aufnahmen.	229
Abb. 6.2-33: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis D, siehe Tab. 6.2-14).	230
Abb. 6.2-34: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen D bis G, siehe Tab. 6.2-14).	231
Abb. 6.2-35: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen G bis I, siehe Tab. 6.2-14).	232
Abb. 6.2-36: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ in 3D-Ansicht (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen D→G, siehe Tab. 6.2-14).	234
Abb. 6.2-37: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten der TLS-Aufnahmen.	235
Abb. 6.2-38: Veränderungen am „Prallhang am Querprofil 17-20“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis D, siehe Tab. 6.2-16).	236
Abb. 6.2-39: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten der TLS-Aufnahmen.	238
Abb. 6.2-40: Veränderungen am „Wetterloch“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis I, siehe Tab. 6.2-18).	239

Abb. 6.2-41: Wasserstandsganglinie an der „1. Rückleitung-Prallhang“ mit eingezeichneten Zeitpunkten der TLS-Aufnahmen.....	243
Abb. 6.2-42: Untersuchter Bereich am Scanstandort „1. Rückleitung-Prallhang“ mit Dokumentation der Veränderungen (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis Y, siehe Tab. 6.2-20 bzw.6.2.-21) (leicht verändert nach FISCHER und CYFFKA in press).....	244
Abb. 6.2-43: Hangrückverlagerung an drei Transekten (165°,180°,210°) an der „1. Rückleitung-Prallhang“.....	245
Abb. 6.2-44: Hangrückverlagerung an den drei Transekten aus Abb. 6.2-43.	247
Abb. 6.2-45: Hangrückverlagerung an der „1. Rückleitung-Prallhang“ mit angelegtem Kreisbogen.....	248
Abb. 6.2-46: Eigendynamische Laufentwicklung an der Fließgewässerstrecke an der „1. Rückleitung“..	250
Abb. 6.2-47: Höhenmodell aus UAV-Befliegung für den Bereich der „Wegekreuzung“.....	252
Abb. 6.2-48: Orthophoto aus UAV-Befliegung für den Bereich der „Wegekreuzung“ zur ÖF am 14.06.2012.	252
Abb. 7-1: Schematische Darstellung der Auswirkungen von Schwankungen in den Wasserständen im Ottheinrichbach.....	259
Abb. 7-2: Schematische Darstellung zwischen gesteuerten und ungesteuerten Verhältnissen bei ÖF und natürlichem Hochwasser (FISCHER und CYFFKA 2014, S. 175)	261
Abb. 7-3: Schematische Darstellung der Abflussverhältnisse (vgl. Tab. 4-5) im OHB mit mittlerer Dauerlinie der Unterschreitungstage.....	262
Abb. 7-4: Erosion durch vertikale Eislasten nach fallendem Wasserspiegel am OHB.....	280
Abb. 8-1: Patient Gewässersystem: Analogie zwischen medizinischer Behandlung und Gewässerentwicklung (REY 2004, S. 11).	288

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Fließgewässer mit ökologisch-morphologischen Teilräumen im Querprofil, in Anlehnung an NIEHOFF (1996) und POTT & REMY (2000).	12
Tab. 1-2: Skala der Natürlichkeit und Biotopqualität nach DOETSCH & RÜPKE (1998 in HOLLÄNDER et al. 2010), WULF (2001) und BECHTELER et al. (2013).	14
Tab. 1-3: Verschiedene Konzepte und Bezeichnungen zur Renaturierung aus ZERBE & WIEGLEB (2009, S. 4).	16
Tab. 2-1: Fließgewässerökologische Konzepte mit ihrem wasserwirtschaftlichen Anwendungsbezug (verändert und ergänzt nach BORCHARDT (1996)).	31
Tab. 3-1: Hydrologischer und gewässermorphologischer Funktionskomplex eines gewässerökologischen Zielsystems (DVWK MERKBLATTENTWURF 1996 in SCHERLE 1999, S.1-13).	51
Tab. 4-1: Veränderungen durch menschliche Aktivitäten seit 1825 im Einzugsgebiet der Donau bis zum Pegel Ingolstadt (BSLU 1985, FINSTERER 1996, WAF 1998 in MARGRAF 2004, SCHLEGEL 2000A).	63
Tab. 4-2: Gewässerkundliche Hauptzahlen (Pegel Ingolstadt Luitpoldstrasse, Daten LFU-GKD 2015).	72
Tab. 4-3: Hochwasserabflüsse (HQ) und Niedrigwasserabflüsse (NQ) vorgegebener Wiederkehrzeiten in m ³ /s, Daten (LFU-GKD 2015).	73
Tab. 4-4: Klimastationen in der Umgebung.....	77
Tab. 4-5: Steuerung in Abhängigkeit des Donauabflusses am Pegel Bergheim.	81
Tab. 4-6: Bauwerke mit lokalen Bezeichnungen im Untersuchungsgebiet	90
Tab. 5-1: Fließgewässer-Systeme (FG) im UG und GW-Bereich.....	97
Tab. 5-2: Information zum Leica GS09 GNSS (Herstellerangaben, LEICA 2009).....	104
Tab. 5-3: Verhältniszahlen zur Charakterisierung der Abflussunterschiede und Wasserstände nach DVWK (1984) und HUGO et al. (2012).	108
Tab. 5-4: Übersicht über die berechneten hydrologischen und hydraulischen Parameter...109	
Tab. 5-5: Bei einer Kartierung nach dem Vor-Ort-Verfahren aufzunehmende Einzelparameter und übergeordnete Ebenen für kleine bis mittelgroße Fließgewässer nach Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2000)..	116
Tab. 5-6: AscTec Falcon 8 und Sony Nex-5, (Herstellerangaben Ascending Technologies ASC TEC 2015).....	117
Tab. 5-7: Aufnahmen zur Querprofilvermessung.	122
Tab. 5-8: Übersicht über die berechneten morphometrischen Parameter	126
Tab. 5-9: Eigenschaften des Vermessungssystems 3D Terrestrischer Laserscanner (LMS-Z420i) und Digitalkamera mit Objektiv (KRAUS 2007), und Herstellerangaben (RIEGL 2010, CANON 2015, NIKON 2015).	128
Tab. 5-10: <i>Cut and Fill</i> -Tabelle mit Erweiterung am Beispiel des Scanstandortes „Troglücke“ Aufnahme A→B.	141

Tab. 5-11: Methoden zur Erfassung abiotischer Parameter, Prozesse und Strukturen.	145
Tab. 6.1-1: Übersicht über die bisher erfolgten Ökologischen Flutungen.....	147
Tab. 6.1-2: Übersicht über ausgewählte hydrologische Ereignisse.....	148
Tab. 6.1-3: Anzahl und durchschnittliche Dauer der Hochwasserereignisse in den Jahren (1939-2000) nach WWA Ingolstadt, ergänzt um die Jahre 2010-2014 mit Daten vom Pegel Luitpoldstrasse, Quelle: LFU-GKD (2015).....	154
Tab. 6.1-4: Gewässerkundliche Hauptzahlen (Monatswerte) OHB nach WWA-Daten (Pegel Ausleitungsbauwerk OHB) und eigene Messungen (Pegel P01 „Trogrücke“ und P03 „Wegekreuzung“).....	156
Tab. 6.1-5: Minima, Maxima, Mittelwerte, Wasserstandsschwankungsamplituden (Max-Min, grau unterlegt) und Standardabweichung (berechnet auf Basis von Tagesmittelwerten) an den Pegelstandorten der stationären Pegel.....	159
Tab. 6.1-6: Distanz- bzw. Ähnlichkeitsmaßzahl (euklidische Distanz) ausgewählter Pegelstandorte.....	161
Tab. 6.1-7: Steuerung der Bauwerke während der fünften und sechsten ÖF.....	170
Tab. 6.1-8: Einteilung der ÖF inkl. Hochwasser.....	175
Tab. 6.1-9: Verhältniszahlen zur Charakterisierung der Abflüsse in der Donau und im OHB nach DVWK (1984) und nach Kern (2000 in HUGO et al. 2012).....	179
Tab. 6.1-10: Hydrologische Kennwerte, berechnet aus Daten der Querprofilvermessung und bezogen auf das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).....	180
Tab. 6.2-1: Gewässerstrukturelemente 2010, 2011 und 2012, bezogen auf die ersten zwei Kilometer Fließgewässerstrecke („Trogrücke“–„südlich Albenschüttweiher“)..	187
Tab. 6.2-2: Vergleich der Totholzkartierungen im Bereich der Wegekreuzung.	190
Tab. 6.2-3: Dimensionsbeschreibende Querprofilgrößen für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke.	195
Tab. 6.2-4: Formbeschreibende Querprofilgrößen für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke.	197
Tab. 6.2-5: Dimensions- und formbeschreibende Querprofilgrößen für das Niveau des mittleren Wasserstandes (Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke.	198
Tab. 6.2-6: Korrelation morphometrischer und hydraulischer Parameter der Querprofile an den OHB-Neubaustrecken.	205
Tab. 6.2-7: Scanstandorte mit Anzahl der Aufnahmen und Scanpositionen an den Scanstandorten.	211
Tab. 6.2-8: Wasserstände zu den Scanaufnahmen im Zeitraum vom 09.06.2010 bis 19.07.2013.	213
Tab. 6.2-9: Umbaumaßnahmen an den Scanstandorten.	213

Tab. 6.2-10: Scanaufnahmen und Anzahl der jeweiligen Scanpositionen am Scanstandort „Trogbrücke“	214
Tab. 6.2-11: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis F am Scanstandort „Trogbrücke“	221
Tab. 6.2-12: Scanaufnahmen und Anzahl der jeweiligen Scanpositionen am Scanstandort „Radbrücke“	224
Tab. 6.2-13: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis E am Scanstandort „Radwegbrücke“	227
Tab. 6.2-14: Scanaufnahmen und Anzahl der jeweiligen Scanpositionen am Scanstandort „Wegekreuzung“	228
Tab. 6.2-15: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis I am Scanstandort „Wegekreuzung“	233
Tab. 6.2-16: Scanaufnahmen und Anzahl der jeweiligen Scanpositionen am Scanstandort „Prallhang am QP 17-20“	235
Tab. 6.2-17: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis D am Scanstandort „Prallhang am Querprofil 17-20“	237
Tab. 6.2-18: Scanstandort „Wetterloch“ mit Scanaufnahmen	2388
Tab. 6.2-19: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis I am Scanstandort „Wetterloch“ Ergebnistabelle	241
Tab. 6.2-20: Scanaufnahmen und Anzahl der Scanpositionen am Scanstandort Scanstandort „1. Rückleitung“	242
Tab. 6.2-21: Erosion und Akkumulationsraten am Standort „1. Rückleitung-Prallhang“ (in fett Aufnahmezeitpunkte zur Abbildung 6.2-42, ergänzt aus FISCHER und CYFFKA (in press))	248
Tab. 8-1: Hydrologischer und gewässermorphologischer Funktionskomplex sowie der Teilkomplexe eines gewässerökologischen Zielsystems	285

Abkürzungsverzeichnis

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ALS	Airborne Laserscanning
B/B _{BV}	Gewässerbreite/Gewässerbreite bei bordvollem Niveau
B +(Zahl)	Brücke (Brückenbauwerk mit Nummer)
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
D +(Zahl)	Durchlass (mit Nummer)
DEM/DTM	Digital elevation model/Digital terrain model
DGM	Digitales Geländemodell
dGPS	differentielles-GPS (siehe GPS)
DoD	DEM of Difference
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSM	Digital Surface Model
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
F +(Zahl)	Furt (mit Nummer)
FG	Fließgewässer
GKD	Gewässerkundlicher Dienst Bayern
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem (Global Navigation Satellite System)
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem (NAVSTAR-Global Positioning System) als Abkürzung für GNSS verwendet
GW	Grundwasser
GWA	Grundwasserabsenkung
GWM	Grundwassermessstelle
HND	Hochwassernachrichtendienst
HW	Hochwasser
HQ	Hochwasserabfluss
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Lidar	Light detection and ranging
LMB	Längenmühlbach
LoD	Level of Detection
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
MID	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
NAVSTAR	Navigational Satellite Timing and Ranging
NID	Niedrigwasser Informationsdienst
ÖF	Ökologische Flutung
OHB	Ottheinrichbach
PG	Projektgebiet
PH	Prallhang
Q	Abfluss

QP	Querprofil
R-P-A	Riffle-Pool-Abfolge
T	Gewässertiefe
TLS	Terrestrisches Laserscanning
tPÖF	temporäre Pegel Ökologische Flutung
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UG	Untersuchungsgebiet
UG _{Gew}	Umgebungsgewässer
W	Wasserstand
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WSA	Wasserstandsschwankungsamplitude
WWA	Wasserwirtschaftsamt
ZK	Zeller Kanal

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation und Relevanz

„Der Mensch will immer, dass alles anders wird, und gleichzeitig will er, dass alles beim alten bleibt“ (COELHO 2007)“...“Wenn alles bleiben soll, wie es ist...“ (TOMASI DI LAMPEDUSA 1959) dann müssen wir alles ändern!

Passender könnte man die Arbeit am Fluss und in der Aue wohl kaum umschreiben.

Einerseits wollen wir die restlichen Relikte der Auen erhalten, andererseits wollen wir aber keineswegs den Zustand, in dem sie sich befinden, bewahren, sondern eher die Dynamik fördern, um das Land am Wasser (= „ouwa“, althochdeutsch) wieder zu dem zu machen, was es einmal war.

Wie es um die Auen in Deutschland und ihren Zustand steht, wissen wir spätestens seit dem 2009 veröffentlichten Bericht des Bundesamtes für Naturschutz (BMU & BfN 2009) und der Studie „Flussauen in Deutschland – Erfassung und Bewertung des Auenzustandes“ (BRUNOTTE et al. 2009). Ökologisch funktionsfähige Auen machen heute weniger als 10 % der rezenten Auen aus, und wie auch an den anderen großen Strömen Europas sind ehemalige Überschwemmungsflächen verschwunden. Auch an den Auen der Donau sind nur noch 10 % bis 20 % der einstigen Auenflächen vorhanden (BMU & BfN 2009). Diese Ergebnisse sollen exemplarisch den zum Teil alarmierenden Zustand der Auenlandschaften, wie wir sie heute vorfinden, beschreiben. Das Leben des Menschen ist in vielen Bereichen von Ökosystemen beeinflusst oder hängt von Dienstleistungen unterschiedlicher Ökosysteme ab. Diese Leistungen können jedoch nur von funktionstüchtigen Systemen erbracht werden. Zahlreiche Autoren attestieren Auen und Fließgewässern eine hohe Kompetenz, bestimmte Ökosystemdienstleistungen (wie z.B. Hochwasserschutz, Nährstoffrückhalt, Holzproduktion) bereitzustellen (TOCKNER & STANFORD 2002, BRAUMAN et al. 2007, TURNER et al. 2008, SCHOLZ et al. 2012).

Diese „kostenlosen“ Leistungen werden aber oft nicht wahrgenommen. Im Gegensatz dazu stehen die großen Hochwasserereignisse der letzten Jahre im Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit. Betrug doch die volkswirtschaftlichen Kosten der beiden Ereignisse 2002 und 2013 in den Einzugsgebieten von Elbe und Donau allein in Deutschland mehr als 21 Milliarden Euro (BfN 2015). Verstärkt durch die Diskussionen um den globalen Klimawandel und aufgrund zunehmender Extremereignisse werden Sichtweisen verschärft und die Forderung nach „noch mehr“ Hochwasserschutz immer lauter. Auch wenn an der Elbe nachgewiesen ist, dass der monetäre Wert des ökologischen und ökonomischen Nutzens naturverträglicher Hochwasserschutzmaßnahmen in etwa dreimal so hoch ist wie ihre Kosten (GROSSMANN et al. 2010), bleiben Umsetzungen nicht selten hinter den Möglichkeiten. Aber die alleinige Forderung nach „mehr Raum für die Flüsse“ wird der Komplexität des Ökosystems nicht gerecht. Nicht nur Hochwasser-, sondern auch Niedrigwasserphasen, die bislang weniger im Interesse der Öffentlichkeit standen, sind von

großem wasser- und energiewirtschaftlichen Interesse. Auch gewässerökologisch werden die abnehmenden Niedrigwasserabflüsse und die länger werdenden Perioden von Niedrigwasser verschiedene Anpassungsmaßnahmen erfordern, um die Schäden möglichst gering zu halten.

Vorbeugender, naturverträglicher Hochwasserschutz und der Erhalt der biologischen Vielfalt sind allgemeine Ziele zur Sicherung der Lebensqualität. Für die Zielerreichung „*müssen Fließgewässer renaturiert, der Wasserhaushalt in den Quellregionen verstärkt und den Flüssen ein Teil ihrer natürlichen Überschwemmungsflächen zurückgegeben werden*“ (BFN 2015, S. 10). Der Erhalt und die Wiedergewinnung natürlicher Retentionsräume sowie die standortgerechte Nutzung von Flussauen sind dafür notwendige Voraussetzungen (MEHL 2004).

Auch für die Strategie zur biologischen Vielfalt ist ein zentrales Ziel formuliert:

„Bis 2020 sind Fließgewässer und ihre Auen in ihrer Funktion als Lebensraum soweit gesichert, dass eine für Deutschland naturraumtypische Vielfalt gewährleistet ist. [...] Bis 2020 verfügt der überwiegende Teil der Fließgewässer wieder über mehr natürliche Überflutungsräume.“ (BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2007, S. 35)

Die EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) hat Fließgewässer zum Gegenstand von zahlreichen Untersuchungen gemacht und das Bewusstsein für Fließgewässer in der Gesellschaft erhöht. Europaweit wurden Bewertungsverfahren und Verbesserungsmaßnahmen vollzogen, um bis 2015 die ersten, bis 2027 weitere Gewässer in einen besseren, den „guten Zustand“, zu überführen (WRRL 2000/60/EG).

Bereits im ersten Bewirtschaftungszeitraum 2010 bis 2015 wurden „*enorme Anstrengungen unternommen, Bayerns Gewässer durch viele Einzelmaßnahmen naturnaher zu gestalten*“ (STMUV 2014, S. 36). Trotzdem zählen die hydromorphologischen Veränderungen zu den bedeutendsten Belastungen der Oberflächenwasserkörper.

Bereits seit Jahren ist auch im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) § 31 festgehalten „*nicht naturnah ausgebaute natürliche Gewässer so weit wie möglich wieder in einen naturnahen Zustand*“ zurück zu führen. Beschäftigt man sich damit im Detail, ist das eine anspruchsvolle Aufgabe.

Für eine erfolgreiche Umsetzung und Zielerreichung ist die Kenntnis von hydrologischen und gewässermorphologischen Prozessen und die Beurteilung der dynamischen Veränderung morphologischer Strukturen entscheidend. Zwar konnte die Gewässergüte (chemisch-biologisch) bereits deutlich verbessert werden, aber der Zustand des Gewässerbettes, der Sohle, des Ufers und besonders der Aue muss oft noch mit „mangelhaft“ bewertet werden (DICKHAUT et al. 2006, BMU 2013A, 2013B).

Speziell für diese ökomorphologischen Bewertungen wurde mit der Gewässerstruktur-gütekartierung ein standardisiertes Verfahren entwickelt. Die Parameter erlauben eine nicht nur qualitative Einschätzung und liefern zudem ein Instrument, mit dem unterschiedliche

Fließgewässer (FG) miteinander verglichen werden können, dennoch bleibt die Bewertung durch die jeweiligen Bearbeiter subjektiv. Nicht nur aus wasserbaulicher und hochwassertechnischer Sicht besteht Bedarf an Kenntnissen über den morphologischen Zustand und die eigendynamische Entwicklung von FG, sondern auch aus naturschutzfachlicher und gesellschaftspolitischer Sicht.

Allein für die in den letzten Jahren so zahlreich entstandenen „neuen Fließgewässer“, die als Umgehungs bäche um Staustufen und Querbauwerke angelegt worden sind, gibt es Bedarf an wissenschaftlicher Untersuchung zu Funktionalität und Effizienz dieser Maßnahmen. Dabei sollte der Schwerpunkt nicht immer nur auf der aquatischen Durchgängigkeit liegen, sondern auch die gewässermorphologischen Aspekte berücksichtigen. Bisher allerdings fehlen umfangreiche fluvial-morphologische Untersuchungen zu solchen „Bach-Anlagen“.

Im Rahmen des E+E-Begleitvorhabens „Monitoring auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen“ MONDAU (siehe Kapitel 1.2) wurde die einmalige Gelegenheit geschaffen, die Steuerung der hydrologischen Einflussgrößen und deren Auswirkungen für ein neues Fließgewässer und die angrenzende, sich entwickelnde Aue umfassend untersuchen zu können. Ein Teil der in den Donauauen durchgeführten Arbeiten soll in der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden.

1.2 MONDAU

Das Projekt des Freistaates Bayern und der bayerischen Wasserwirtschaft wird vom Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt ausgeführt. Das Projekt „Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt“ ist zwar nur eines von vielen Renaturierungsprojekten in mitteleuropäischen Flussauen, jedoch eines der wenigen mit einem interdisziplinär angelegten Monitoringprogramm (MONDAU – **MON**itoring **DonauAU**en; www.mondau.de). Die Dreiteilung in unterschiedliche Maßnahmenpakete, die folgend vorgestellt werden, ist zudem einzigartig.

1. Anlage eines permanenten Aubaches (Ottheinrichbach = OHB) bei gleichzeitiger Wiederherstellung der aquatischen Durchgängigkeit der Donaustaustufe Bergheim (Umgebungsgewässer) (Dotierung: 1,0-5,0 m³/s, Länge: 8,4 km)
2. Ökologische Flutung (ÖF) des Auwaldes bei kleinen Hochwasserereignissen geringer Jährlichkeiten mit bis zu 30 m³/s Ausleitungsmenge
3. Grundwasserabsenkung (GWA) bei Niedrigwasserführung der Donau (als Teil eines E+E-Vorhabens des Bundesamtes für Naturschutz)

Die Kombination dieser Maßnahmen soll auentypische Verhältnisse in einem durch zwei Staustufen beeinflussten Flussabschnitt an der bayerischen Donau wiederherstellen. Mit der Möglichkeit Wasserstände zu regeln, können niedrige Wasserstände simuliert, aber auch hochwasserähnliche Zustände mit erhöhten Abflüssen erreicht werden. Ziel ist die Wiederherstellung bzw. Förderung auentypischer Biozönosen und Biotope mittels der drei o.g. Maßnahmen. Dabei sollen vor allem die dynamischen Prozesse (hydrologisch und geomorphologisch) zur Förderung auentypischer Arten und Lebensräume im bestehenden Auwald unterstützt oder ggf. neu angeregt werden (FISCHER & CYFFKA 2014).

Im Rahmen des E+E-Begleitvorhabens „Monitoring auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen“ arbeiteten von 2009 bis 2014 acht Arbeitsgruppen aus unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen zusammen (Abb.1-1), um den Erfolg eines Projektes zur Auenrenaturierung wissenschaftlich zu begleiten (STAMMEL et al. 2012). Über die Förderung durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) konnten viele Aspekte und Auswirkungen disziplinübergreifend untersucht werden. Mit dem Teilprojekt II „Fluviale Morphodynamik, Bodenfeuchte und Grundwasser“ wurden die abiotischen Faktoren und Prozesse untersucht.

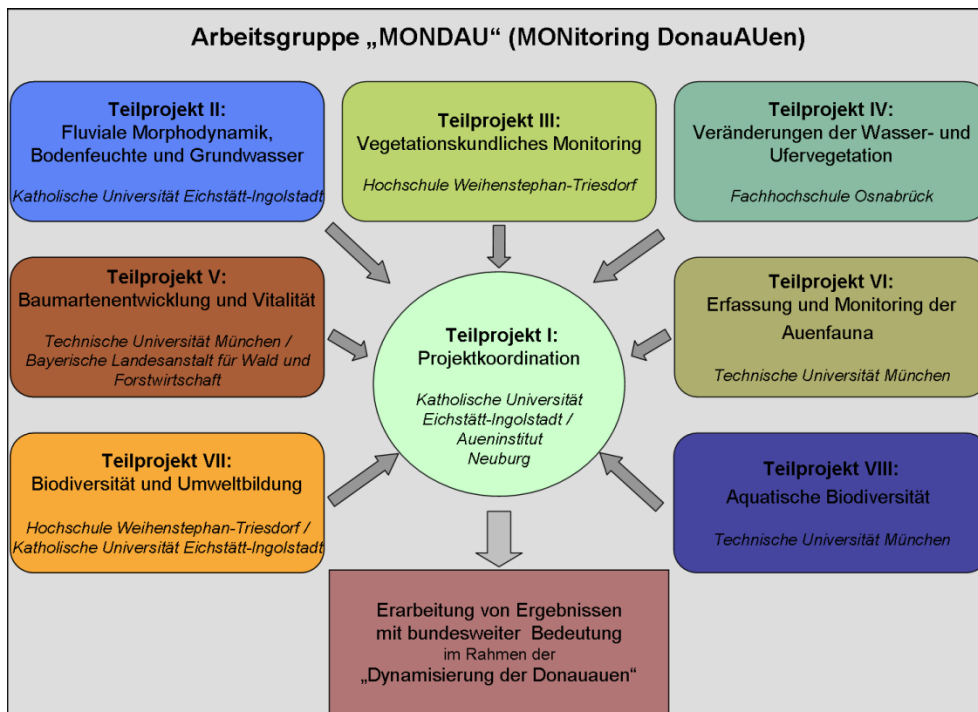


Abb. 1-1: Aufbau des E+E-Vorhabens MONDAU mit den acht Teilprojekten und den beteiligten Institutionen. Quelle: Aueninstitut.

1.3 Auen und Renaturierung: Begriffe und Erläuterungen

1.3.1 Allgemeines

In den folgenden Gliederungspunkten dieses Einleitungskapitels werden einige Begriffe, die im Rahmen der Arbeit häufiger Verwendung finden, vorgestellt. Damit sollen bereits einige charakteristische Merkmale von Auen und Fließgewässern herausgearbeitet und die mit ihnen zusammenhängenden Frage- oder Problemstellungen aufgezeigt werden. Auf wesentliche Punkte wird durch ein Zwischenfazit am Ende des jeweiligen Absatzes noch einmal explizit eingegangen, um den Sachverhalt kurz und deutlich herauszustellen. Diese Passagen sind mit Pfeilen vom restlichen Text eingerückt und so schnell zu erkennen. Für eine schnelle Übersicht und Einführung in die Thematik können auch nur diese als eigenständige Textbausteine gelesen werden.

Unsere heutigen Auen sind das Relikt einer intakten Flusssdynamik, wie sie bis vor etwa 120 Jahren anhielt. Flussauen, wie wir sie heute kennen, sind „temporäre Endzustände von geomorphologisch-biologisch-hydrologischen Systemen“ (HEINE 2001, S. 6). Seit jeher sind sie einem ständigen Wandel unterworfen, der in Sprüngen erfolgen kann, wenn es sich beispielweise um Hochwasserereignisse handelt, oder sehr langsam über tektonische Ausgleichsbewegungen. Vom Menschen werden sie seit rund 4000 Jahren beeinflusst (PETTS et al. 1989). Auenlandschaften reagieren unterschiedlich, manchmal sind sie über

lange Zeiten quasi stabil und können sich von einer „Störung“ erholen, manchmal sind sie einem ständig andauernden Wandel unterzogen.

→ Flusslandschaften sind hoch komplexe, dynamische Systeme mit unterschiedlichen Reaktionszeiten. Seit langem werden sie auch vom Menschen mitgestaltet.

Wenn diese natürliche Dynamik und die Interaktion zwischen Sediment- und biologischen Systemen unterbunden ist, weil allen voran die hydrologische Komponente weitgehend entkoppelt wurde, ergeben sich neue „sehr stabile“ – auenuntypische Zustände. Will man dieser Entwicklung entgegenwirken und die Dynamik wieder zurückbringen, sind interdisziplinäre Ansätze gefragt.

„Es ist eine große wissenschaftliche Herausforderung, ein Verständnis für diese komplexen vernetzten Systeme bei denjenigen zu wecken, die die Anforderungen definieren, die an Flußauen mit ihren Fließgewässern von Seiten der Raumplanung, der Wirtschaft, des Verkehrs und der Politik gestellt werden.“ (HEINE 2001, S. 6)

→ Wenn die Verbindung zwischen Fluss und Aue durch anthropogene Maßnahmen getrennt wurde, ergeben sich weitreichende Folgen, die interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordern.

Nach KERN (1994) sind im Rahmen von Renaturierungen an Fließgewässern aus gewässermorphologischer Sicht zwei generelle Ziele anzustreben:

- eine gewässertypische Morphodynamik
- eine gewässertypische Strukturvielfalt

Diese Ziele können jedoch nur erreicht werden, wenn auch eine gebiets- und gewässertypische Abfluss- und Feststoffdynamik erhalten oder wiederhergestellt wird.

Jedes FG, insbesondere ein morphologisch verändertes (naturnah angelegt oder durch gezielte Maßnahmen zur Entwicklung zu naturnahen Verhältnissen unterstützt) besitzt ein spezifisches Potenzial für eine eigendynamische Entwicklung. Wesentliche Unterschiede zu natürlichen Gewässern bestehen allerdings in Hinblick auf den Faktor „Zeit“. „Frische“, von der Baggerschaufel erzeugte Ufer und „unbenutzte“ Gewässerbetten reagieren unmittelbar auf das Medium Wasser und die sich schnell einstellenden Strömungsverhältnisse. Auch im weiteren Verlauf ist mit einer wesentlich schnelleren Entwicklung zu rechnen als dies bei natürlichen FG der Fall ist. Von zentraler Bedeutung bleibt aber auch bei neuen Bächen die Häufigkeit und Dauer bordvoller Abflusssituationen, bei denen die Erosion und Bettbildung am stärksten ist.

→ Unterschiede bei der eigendynamischen Entwicklung zwischen natürlichen Flüssen und naturnah angelegten sind kaum bekannt.

Entwicklungsrestriktionen, die aus Eigentumsverhältnissen, anthropogenen Nutzungsansprüchen und Anforderungen der Verkehrs- und Hochwassersicherheit resultieren, müssen bei der Planung und Durchführung von Renaturierungsmaßnahmen Berücksichtigung finden. Auch eine nicht entfernte Gerinnefixierung oder Brückenbauwerke wirken der Selbstentfaltung entgegen. Einen größtmöglichen Freiraum für das Gewässer zu schaffen, ohne dabei die Rahmenbedingungen zu überschreiten, ist eine besondere Herausforderung.

→ Jeder Eingriff, der nicht die Eigendynamik fördert, schränkt diese mehr oder weniger stark ein.

Welchen Raum der Fluss für die eigendynamische Entwicklung in Anspruch nehmen wird, wie schnell sich ein neu geschaffenes FG zu einem im „dynamischen Gleichgewicht“ befindlichen Fließgewässersystem entwickelt und ob damit die Renaturierung einer Aue erfolgen kann, sind einige Fragen, die sich in diesem Zusammenhang stellen. Um diese zu beantworten, sind nicht nur Kenntnisse über die Erosionsgeschwindigkeit des Ufers, sondern auch über die im FG ablaufenden Umlagerungsprozesse notwendig. Die ÖF führen zu verstärkten Seiten-/Krümmungserosionsereignissen, die abhängig von Häufigkeit und Dauer maßgeblich zur Entwicklung beitragen.

Viele Untersuchungen wurden in sandführenden Flüssen mit kohäsivem Material getätigt und die Entwicklung und Migration von Mäandern beschrieben. Trotz der großen Bedeutung im Wasserbau ist der Prozess der Seitenerosion in kiesführenden Flüssen bisher relativ wenig erforscht (vgl. REQUENA 2008). Dem Verfasser sind weder Untersuchungen zur Entwicklung der Seitenerosion an künstlich angelegten Gerinnen unter gesteuerten Abflüssen, noch zu simulierten kleinen Hochwasserereignissen durch ÖF bekannt.

→ Die Problematik einer Prognose zur „morphologischen Aktivität“ hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ab, die zeit- und ortsabhängig sind und sich gegenseitig beeinflussen. Die gewässertypische Morphodynamik ist bei naturnah angelegten, insbesondere bei neuen Fließgewässern ein bisher wenig erforschter Sachverhalt.

Während 1996 eine Tagung mit dem Titel „Sanierung und Renaturierung von Fließgewässern“ das Interesse von 350 Personen aus unterschiedlichen Fachgebieten wecken konnte (TÖNSMANN 1996), könnte man nun 20 Jahre später wohl eher ein Zehntel dafür begeistern. Haben wir schon alles gelernt? Oder gibt es keine neuen Erkenntnisse mehr, die ausgetauscht werden müssen? Sind gar schon alle FG renaturiert? Das ist sicher

nicht der Fall. Sind doch die Aufgaben immer noch so vielfältig und komplex und der Zustand der Fließgewässer oder Bestand und Erhalt der Auen noch lange nicht gesichert.

→ Das Thema „Renaturierung“ ist inzwischen vielfach behandelt worden, Förderungen nehmen ab, ungelöste Fragen bleiben.

1.3.2 Abgrenzung des Auenbegriffs

Neben Grundlagen zu Auenökosystemen muss auch eine einheitliche Terminologie verwendet werden, um Missverständnisse zu vermeiden. Deshalb wird ein Auszug von relevanten Begriffen näher erläutert, die im Zusammenhang mit Renaturierung an Fließgewässern und Auen sowie im Rahmen dieser Arbeit stehen.

Die Abgrenzung der Aue ist sowohl theoretisch (aufgrund zahlreicher Definitionsversuche) als auch in der Praxis nicht ganz einfach. Zudem ist die natürliche Grenze einer Aue im Gelände nicht mehr überall ohne weiteres sichtbar. Durch zahlreiche Eingriffe ist vielerorts eine anthropogene Grenze entstanden, die eine ehemals meist den ganzen Talboden umfassende, natürliche Aue auf einen minimalen Korridor, der meist zwischen Steinschüttungen verläuft, schrumpfen ließ. Die Aue als Standort, ständig im potenziellen Einflussbereich des Wassers bei Überschwemmung oder hohen Grundwasserständen, zählt zu den artenreichsten Ökosystemen. Sie ist auch ein Ort für Forschungsarbeiten verschiedenster Disziplinen, die jeweils unterschiedliche Abgrenzungen ziehen.

Ausgewählte Definitionen:

„Als Au (Aue, Auen) bezeichnet man räumlich jene Talzonen, die innerhalb des Einflußbereiches von Hochwässern liegen“ (GEPP 1985, S. 15).

Eine Gewässeraue (water-meadow) ist der *„Talbereich mit im Jahresablauf stark schwankendem Grundwasserspiegel, teils mit Überflutung und Auflandung [...], teils mit Qualmwasseraufstieg“ (DIN 1996: WASSERWESEN-BEGRIFFE, S. 127).*

„Auen sind die von Überflutungen und wechselnden Wasserständen geprägten Talböden und Niederungen an Bächen und Flüssen“ (KOENZEN 2005: vgl. WWW.FLUSSAUEN.DE).

„Auen sind diejenigen Flächen entlang eines Fließgewässers, die auch bei seltenen Hochwassern noch überflutet werden bzw. vom Grundwasser beeinflusst sind“ (DVWK 1998: Feuchtgebiete – Wasserhaushalt und wasserwirtschaftliche Entwicklungskonzepte. DVWK Merkblätter, S. 50).

„Auen sind die natürlicherweise von der Gewässerdynamik (Überschwemmung und Grundwasser) geprägten Gebiete der Fließgewässer“ (KRAIER 2004: AUENPROGRAMM BAYERN).

„Rigorous but simple definition of such areas is probably impossible [...] The floodplain can be described as relatively level areas of sediment deposit by such streams and which are periodically inundated by the streams“ (BREN 1993, S. 278).

„Auen sind die Talböden und Niederungen an Bächen und Flüssen, die von Überflutungen und wechselnden Wasserständen geprägt sind oder deren Ausprägung stark von flurnahem Grundwasser abhängig ist. Die Aue umfasst deshalb im Regelfall die alluvialen Ablagerungen (minerogene Lockersedimente) und die organogenen Bildungen der Talböden. Sie kann häufig räumlich an einer m.o.w. markanten Tal- oder Terrassenkante, dem Übergang vom Talboden zur Talflanke abgegrenzt werden“ (MEHL 2004, S. 12).

In vorliegender Arbeit soll sie als genetische Einheit mit dem(n) Fließgewässer(n) begriffen werden, die neben den Überflutungsflächen auch das Gewässerbett selbst, sowie diverse Strukturelemente mit einschließt.

Flussauen sind damit *„gewordene Strukturen‘ in denen sich die ‚räumlich-zeitliche Zusammenfassung‘ erdgeschichtlicher und historischer Vorgänge widerspiegelt“* (SCHMITHÜSEN 1976, S. 203, vgl. HEINE 2001). Diese „Gegenstände des Geographen“ (der Fluss, die Aue) können auch unter dem Aspekt der „Gegenwartsdynamik“ betrachtet und mit raum-zeitlichen Begriffen umschrieben werden (Prozessmorphologie). Aus der erstgenannten, auf die Strukturen ausgerichteten Betrachtungsweise, resultiert die Unterscheidung und räumliche Trennung der Aue in folgende Bereiche:

A) Die morphologische Aue:

Flussbegleitender Bereich, der heute theoretisch von einem Hochwasser erreichbar wäre, wenn keine Maßnahmen zum Hochwasserschutz existieren würden. Eine eindeutige Abgrenzung ist schwierig, da vielfach veränderte Auenverhältnisse vorliegen (Reversibilität). Die morphologische Aue setzt sich nach BMU und BfN (2009) neben dem Fluss aus den folgenden Teileinheiten Altaue (B) und rezente Aue (C) zusammen (Abb. 1-2).

Die durch anthropogene Veränderungen (Deiche) von der Überflutung abgeschnittenen Bereiche werden als

B) Altaue (historische Aue) bezeichnet. Grundlagen zu ihrer Abgrenzung sind nach Mehl (2004):

- geowissenschaftliche oder historische Daten und Informationen
- Informationen (geologische, pedologische und agronomische) zur Kartierung der ursprünglichen Auenausdehnung
- Rekonstruktion hydrologisch-hydraulischer Verhältnisse durch Geländemodelle und hydraulische Modelle

C) Eine **rezente Aue** (Überschwemmungsaue) bezeichnet die Areale, die noch unter dem Einfluss des (heutigen) Flutungsregimes liegen, einschließlich Polder mit ökologischen Flutungen (BMU & BfN 2009). Das räumliche Erfassen erfolgt zunächst über hydrologische und gewässerhydraulische Berechnungen, bei denen entsprechende Ausuferungslinien gemäß den berechneten oder beobachteten Hochwasserspiegellagen ausgewiesen werden (vgl. LfU-IÜG Informationsdienst Überschwemmungsgefährdeter Gebiete 2015).

Grundlagen zur Abgrenzung nach (MEHL 2004) sind:

- gesetzlich festgelegte Überschwemmungsgebiete und überschwemmungsgefährdete Gebiete (dem HW100/HQ100 entsprechend), im Regelfall gemäß § 32 WHG „Überschwemmungsgebiete“
- Überschwemmungsgebiete und überschwemmungsgefährdete Gebiete nach regionalen Hochwasserschutzkonzepten
- historische Festsetzungen, kartierte Ausdehnung von einzelnen Hochwasserereignissen.

Innerhalb der rezenten Aue ist die

D) Sekundäraue (Ersatzaue) zu finden, die nach der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG 2010, S. 10) so zu umschreiben ist:

„In den Fällen, in denen z. B. durch Prozesse der Tiefenerosion die Verbindung zwischen Gewässer und Primäraue verloren gegangen ist, ist häufig die Anlage bzw. Entwicklung einer sog. ‚Sekundäraue‘ [...] möglich. Hierbei werden durch Abgrabung oder Zulassen/Unterstützung eigendynamischer Prozesse etwa auf der Höhe der aktuellen Fließgewässeroberfläche terrestrische, gewässerbegleitende Randbereiche ausgebildet, die wiederum Überschwemmungen und oder schwankenden Grundwasserständen unterliegen. Eine Sekundäraue ist somit ein tiefer als die ursprüngliche (Primär) Aue liegender Überschwemmungs- und Entwicklungsraum, der die wesentlichen hydromorphologischen Funktionen der Primäraue übernehmen kann und so die Grundlage für eine typspezifische Besiedlung durch Pflanzen und Tiere bietet. Sekundärauen sind in der Regel nutzungsfrei und stehen dem Fließgewässer für mögliche Laufverlagerungen etc. vollständig zur Verfügung“ (TLUG 2010, S. 10, vgl. DWA 2010b).

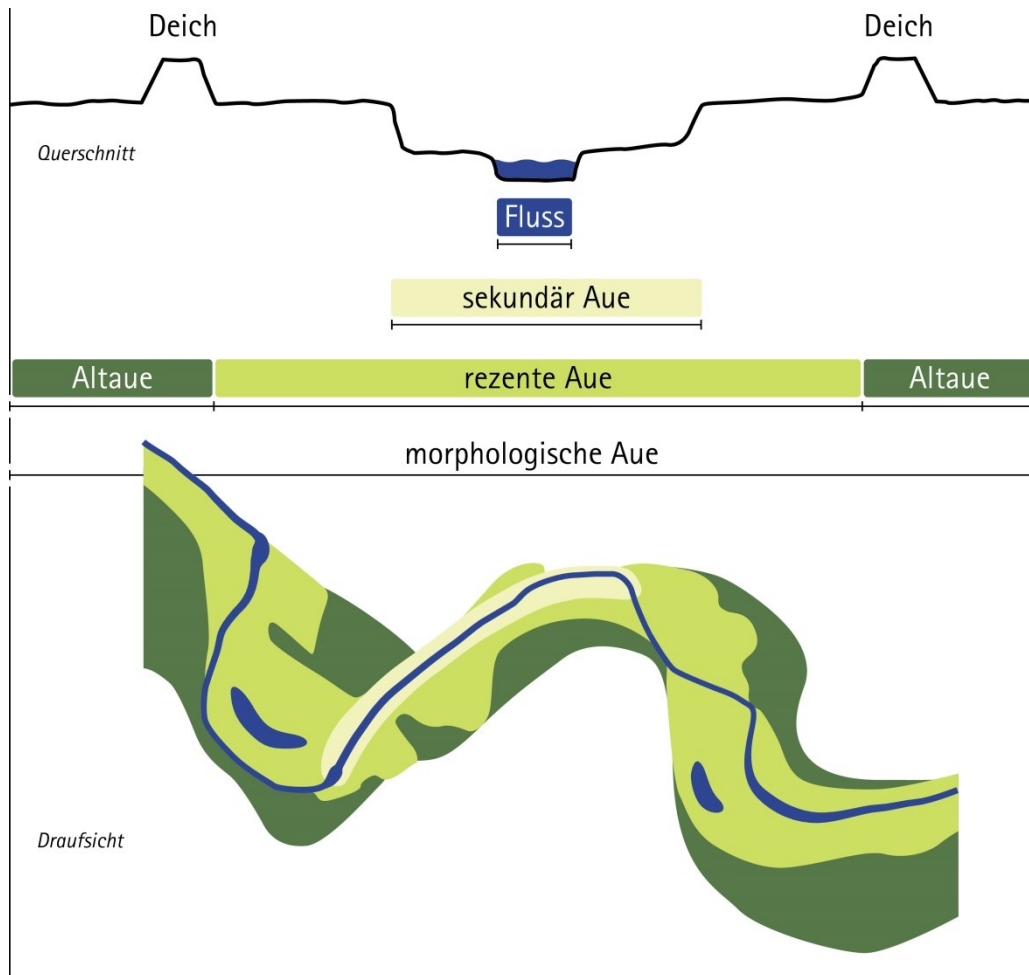


Abb. 1-2: Abgrenzung unterschiedlicher Auentypen mit den jeweiligen Teileinheiten

→ Durch die Flussbaumaßnahmen der Vergangenheit ist die Verbindung zwischen Gewässer und Aue verloren gegangen. In vielen Fällen ist nur durch die Anlage bzw. Entwicklung einer sog. „Sekundäraue“ eine Dynamisierung möglich. Erfahrungen zu Umsetzung, Erfolg und Wirksamkeit sind selten. Für Sekundärauen liegen bisher keine ausführlichen Untersuchungen vor. Ob die wesentlichen hydromorphologischen Funktionen erfüllt werden können, ist daher ungewiss.

Eng mit dem Auenbegriff in Verbindung stehende Bezeichnungen sind:

Überschwemmungsgebiet, überschwemmungsgefährdeter Bereich, Uferstreifen, Uferbereich oder nur Ufer, Gewässerrandstreifen, Entwicklungskorridor usw., die hier aber nicht weiter definiert werden sollen, stattdessen sei auf hilfreiche Glossare verwiesen (AUENGLOSSAR 2010, TLUG 2010, MKULNV 2010).

Der wesentliche Bestandteil ist jedoch das Fließgewässer selbst, ohne das es gar keine Aue geben kann. Der Begriff Fließgewässer umfasst kleine Bäche, Flüsse und gewaltige Ströme mit unterschiedlichem Abflussregime, fluvialer Hydraulik und Transportrate (HEINE 2001).

Eine Abgrenzung zwischen Bach und Fluss wird von LÖLF und LWA (1985) mit 3 bis 5 m Wasserspiegelbreite angegeben. POTT und REMY (2000) weisen bei einem Bach auf die starke Interaktion zwischen Wasserkörper und Ufer hin und auf den sich oft bildenden Kronenschluss der uferbegleitenden Gehölze. Ein Strom wird meist als ein größerer Fluss, ein Gewässer 1. Ordnung und/oder Bundeswasserstraße beschrieben, manchmal der DIN-Norm 4049 folgend, ist er (der Strom) ein FG das ins Meer mündet.

FG können auch nach ökologisch-morphologischen Kriterien in verschiedene Teilbereiche (Tab.1-1) gegliedert werden, als Ganzes bilden sie dann die Bachlandschaft (LEIBUNDGUT & HIRSIG 1984) bzw. die Gewässerlandschaft (BRIEM 2002, PATT et al. 2011). Innerhalb dieser Gewässerlandschaft stehen diese Teilbereiche mit dem Gewässerlauf in unterschiedlicher Intensität in engem Wirkungszusammenhang. Eine grobe Einteilung in einen aquatischen, amphibischen und terrestrischen Bereich wurde von DVWK (1984) und LÖLF und LWA (1985) vorgenommen, eine modifizierte Form dann von BITTMANN (1968) bzw. NIEHOFF (1996) vorgestellt (vgl. POTT & REMY 2000).

Demnach lassen sich folgende ökologisch-morphologischen Teilräume im Querprofil unterscheiden, die bei NIEHOFF (1996) näher beschrieben werden (vgl. Abb. 1-3, Tab. 1-1):

Tab. 1-1: Fließgewässer mit ökologisch-morphologischen Teilräumen im Querprofil, in Anlehnung an NIEHOFF (1996) und POTT & REMY (2000).

Teilräume	Kennzeichen (ausgewählt)	Geomorphologische Strukturelemente	Abgrenzung
Aquatischer Bereich	Frei fließender Wasserkörper (permanente Wasserführung), wassergefüllter Porenraum der Gewässersohle	Riffles und Pools, Sandrippel, Kies, Einzelsteine	Bis zur Höhe des MNW
Uferbereich	Wasserwechselzone im Bereich der Uferböschung und biotopvernetzendes Element (amphibisch)	Flachufer, Basis von Steilufern (Prallhang, Gleithang)	Von der Linie des MNW bis zur Böschungskante (bordvolles Niveau)
Gewässernahbereich	Geländestreifen landwärts, (terrestrisch) aber stark vom FG beeinflusst	Uferdämme	Vom bordvollen Niveau bis zum HQ (allerdings auf einen Geländestreifen, je nach Autor und Größe des FG begrenzt)
Auenbereich (Aue)	Von Überschwemmung und Grundwasser beeinflusste Bereiche	Flutmulden, Flutrinnen Terrassenkanten	HQ ₁₀₀ als äußere Begrenzung im Flach- und Hügelland (in wenig beeinflussten Gebieten)
Übergangsbereich	Äußerer Rand der Gewässeraue (Übergangsbereich)	Auenstufen, pleistozäne Terrassen	Abhängig von topographischen Gegebenheiten

Besonders eine Abgrenzung des Gewässernahbereiches (terrestrischer Lebensraum) als Geländestreifen innerhalb der Aue erscheint auch für vorliegende Untersuchung sinnvoll, da hier einerseits die von NIEHOFF (1996) angesprochenen vielfältigen Nutzungsansprüche (im PG insbesondere der Forstwirtschaft) und wasserwirtschaftlichen Bau- und Gewässerunterhaltungsmaßnahmen stattfinden, andererseits genau dieser Teil des terrestrischen Bereichs von den fluvial-morphologischen Prozessen am stärksten betroffen ist. Unter natürlichen Bedingungen weist er stark wechselnde Substratverhältnisse und veränderte Abflussbedingungen (MUÑOZ-CARPENA et al. 1999, BACH 1999) sowie eine eigene Vegetationszusammensetzung (DISTER 1980) auf. In der Literatur wird häufig nur von einem Gewässerrandstreifen oder Uferstreifen gesprochen (BOHL 1986, DVWK 1998, TLUG 2010), ohne eine klare Trennung des amphibischen und terrestrischen Bereichs zu vollziehen, was aber besonders für ökologisch orientierte Arbeiten problematisch sein kann (NIEHOFF 1996). Auch über die Breite eines gewässerparallelen Geländestreifens finden sich unterschiedlichste Angaben (vgl. OSBORNE & KOVACIC 1993, CASTELLE et al. 1994, NIEHOFF 1996, BACH 1999), beispielsweise das WHG gibt in § 38 eine Breite von 5 m an. Klar ist, dass genau dieser Bereich mit dem sog. Entwicklungskorridor zusammenfällt bzw. in diesem liegt (TLUG 2010), der oft bei Renaturierungsmaßnahmen ausgewiesen wird. Im Idealfall sollte dieser, dann nutzungsfreie Bereich, vollständig dem FG zur eigendynamischen Entwicklung zur Verfügung stehen.

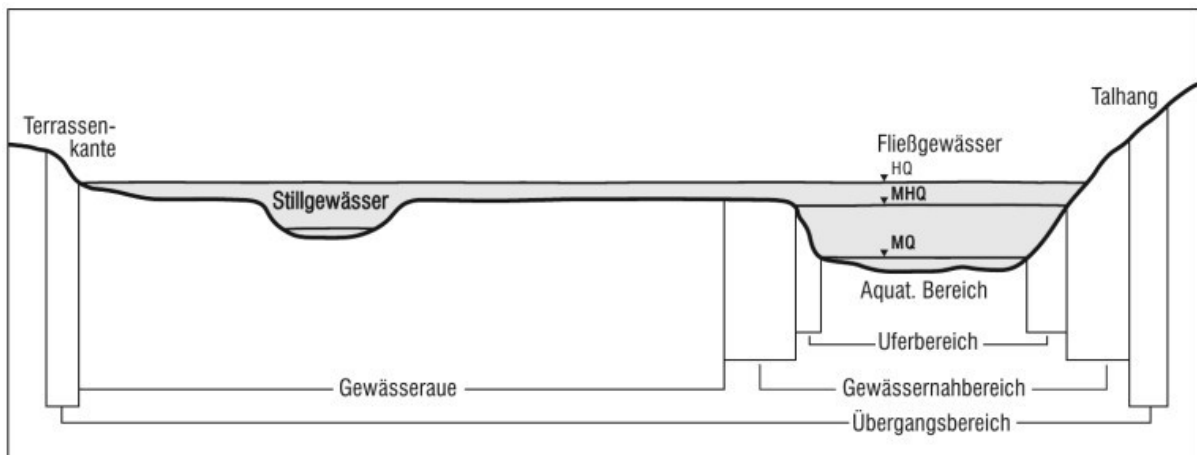


Abb. 1-3: Schematische Darstellung ökologisch-morphologischer Teilräume im Querprofil der Fließgewässer (NIEHOFF 1996, S. 14).

→ Flusslandschaften setzen sich aus vielen verschiedenen kleinen Teillebensräumen zusammen, die in enger Wechselbeziehung stehen. Teilräume isoliert zu betrachten oder zu übergehen, kann zu falschen Einschätzungen und Entscheidungen führen.

1.3.3 Renaturierung – zurück zur Natur

Der Begriff der Renaturierung kann unterschiedlich verwendet werden und es hat sich eine Vielzahl von Konzepten entwickelt (SER 2004, WOOLSEY et al. 2005, ZERBE & WIEGLEB 2009). Teilweise werden nur die Maßnahmen (Baumaßnahmen), manchmal der Prozess (ökologische Verbesserung), manchmal beides darunter verstanden (FISCHER & CYFFKA 2013B). Manchmal hat Renaturierung weniger mit Naturwissenschaften als mit Wertvorstellungen zu tun (vgl. DÜCHS 2014).

Meist wird darunter die „weitgehende Wiederherstellung eines Gewässers in einen naturnahen Zustand“ verstanden (vgl. KNIPPERTZ 2008, LÜDERITZ & JÜPNER 2009, TLUG 2010, PATT et al. 2011).

Dass die Abgrenzung des Gewässers oder der Aue nicht immer gleich vollzogen wird (vgl. DIN 4049, DVWK 1996 in BERGOLZ 2006), konnte bereits aufgezeigt werden. Entsprechend ist auch die Renaturierung zwangsläufig mit Abgrenzungsproblemen (räumlich und theoretisch) behaftet.

Gelöst scheint die Problematik durch die DIN 4047. Hier wird unter Renaturierung

„die Rückführung eines genutzten Landschaftsteiles in einen naturnahen Zustand durch natürliche (sekundäre) Sukzession verstanden. Die Renaturierung soll zu naturnahen oder soweit möglich zu natürlichen Biotopen hinführen und die Landschaft ökologisch aufwerten (bereichern)“ (DIN 4047 in BERGOLZ 2006, S. 33).

Dennoch bleiben die unscharfe Formulierung des naturnahen Zustandes und das Problem der Rückführung – die es praktisch nicht geben kann (Renaturierung im engeren Sinne). Eine umfassende Diskussion zur „Natürlichkeit“ wird von WULF (2001) oder BIRNBACHER (2006) geführt. Meist lässt sich eine Einteilung in fünf Stufen finden (Tab. 1-2): natürlich, naturnah, bedingt naturnah (BAUER 1985, NIEHOFF 1996, BECHTELER et al. 2013) oder halb natürlich (WULF 2001), naturfern und naturfremd bzw. künstlich (DOETSCH & RÜPKE 1998 in (HOLLÄNDER et al. 2010).

Tab. 1-2: Skala der Natürlichkeit und Biotopqualität nach DOETSCH und RÜPKE (1998 in HOLLÄNDER et al. 2010), WULF (2001) und BECHTELER et al. (2013).

Klasse	Beschreibung (DOETSCH & RÜPKE 1998)	Beschreibung (BAUER 1985)	Systemstruktur (WULF 2001)	Systemprozesse (WULF 2001)
natürlich	vom Menschen nicht oder wenig beeinflusste, über längere Zeiträume stabile Gesellschaften	die Bewertungsmerkmale entsprechen vollständig einer vom Menschen nicht beeinflussten Ausprägung	keine Veränderung von Strukturgrößen	keine Veränderung

naturnah	extensive bis aufgegebene Bewirtschaftung, keine externe Energiezufuhr	die Bewertungsmerkmale entsprechen weitgehend einer vom Menschen nicht beeinflussten oder einer naturraumgerechten wiederhergestellten Ausprägung	geringe Veränderung der Ausprägung von Strukturgrößen	Veränderung der Prozessraten
halbnatürlich bedingt naturnah	k.A.	die Bewertungsmerkmale entsprechen nur teilweise einer vom Menschen nicht beeinflussten oder einer weitgehend naturraumgerechten neu geschaffenen Ausprägung	mittlere Veränderung der Ausprägung von Strukturgrößen, natürliches Äquivalent am Standort möglich	Veränderung der Prozessrichtung, aber natürliches Äquivalent am Standort möglich
naturfern	verminderte Bewirtschaftungsintensität ohne Umlagerung des Substrats, aber mit Energiezufuhr und Austrag	die Bewertungsmerkmale liegen in einer vom Menschen weitgehend veränderten Ausprägung vor	mittlere Veränderung der Ausprägung von Strukturgrößen, kein natürliches Äquivalent am Standort	Veränderung der Prozessrichtung, kein natürliches Äquivalent am Standort möglich
naturfremd	hohe Bewirtschaftungsintensität teilweise mit periodischen Umlagerungen des Substrates	die Bewertungsmerkmale liegen in einer vom Menschen vollständig veränderten Ausprägung vor	k.A.	k.A.
künstlich	extrem hohe Nutzungsintensität durch den Menschen	k.A.	starke Veränderung der Ausprägung von Strukturgrößen, kein natürliches Äquivalent am Standort	Unterbindung typischer bzw. essentieller Prozesse, kein natürliches Äquivalent am Standort

Die Definition der Society for Ecological Restoration – *“Ecological restoration is the process of assisting the recovery of an ecosystem that has been degraded, damaged, or destroyed.”* (SER 2004, S. 3) – stellt Renaturierung als Entwicklungsprozess in einem Ökosystem dar, der, auf FG übertragen, zur Wiederherstellung eines naturnäheren Zustandes führt und damit im Sinne von ARONSON et al. (2006) auch bestimmte Ökosystemfunktionen

wiederherstellt.

Einen Überblick über die verschiedenen Konzepte und Bezeichnungen ist bei ZERBE und WIEGLEB (2009) zu finden (Tab. 1-3). Solange es allerdings keine international verbindliche Definition gibt, werden weiterhin eine Vielzahl von Fachtermini unterschiedlich verwendet werden.

Tab. 1-3: Verschiedene Konzepte und Bezeichnungen zur Renaturierung aus ZERBE & WIEGLEB (2009, S. 4).

Konzepte der Renaturierung (im weiteren Sinne)	Übersetzung ins Englische
Extensivierung	de-intensification, extensification
Regeneration	regeneration
Rehabilitation	ursprünglich river rehabilitation (geomorphologisch-hydrologisch begründet), später allgemein auf Ökosysteme ausgeweitet
Rekonstruktion	reconstruction
Rekultivierung	reclamation, remediation, i.w.S. auch re-vegetation, creation, und fabrication
Renaturierung i.e.S.	rehabilitation, restoration
Restauration	restoration, remediation (to repair anthropogenic change)
Restitution	restoration
Revitalisierung	rehabilitation, revitalization
Sanierung	remediation
Wiederherstellung ökologischer Integrität	recovery of ecosystem integrity
Wiederherstellung der Ökosystemgesundheit	recovery of ecosystem health

Auf diesen Grundlagen aufbauend wird in vorliegender Arbeit der Begriff Renaturierung im Sinne der Ökosystemrenaturierung verstanden, der zur Wiederherstellung der gewässertypischen, hydrologischen, morphologischen und ökologischen Situation in und an einem Gewässerbett führt, und kann mit dem Begriff Dynamisierung gleichbedeutend verwendet werden. Die Renaturierung muss sehr häufig – wie auch im Projekt der Dynamisierung – mit Hilfe von naturraumangepassten Gewässerunterhaltungs- und Ausbaumethoden herbeigeführt werden.

Der Versuch von BRADSHAW (1997), eine graphische Definition vorzunehmen (vgl. Abb. 1-4), scheint besonders zielführend, da zwischen „ecosystem structure“ und „ecosystem function“ unterschieden wird. Die Begriffe werden dabei auf der Basis eines Zustandes vor der Umsetzung abgebildet, um den Prozesscharakter hervorzuheben (vgl. WILLIAMS et al. 1997 in WOOLSEY et al. 2005).

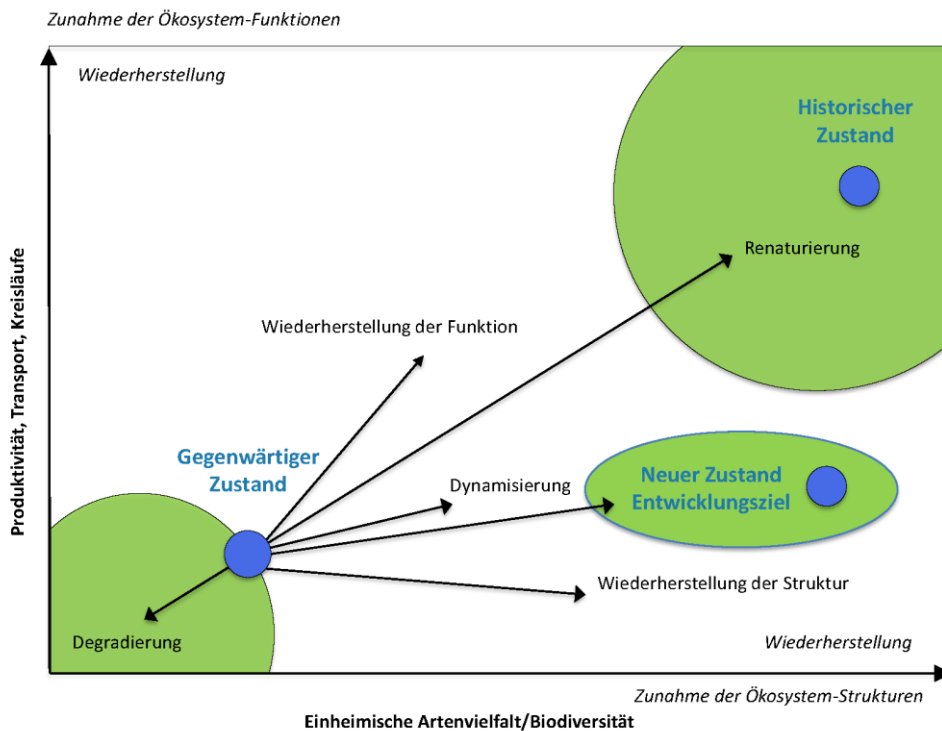


Abb. 1-4: Entwicklungsziel zwischen den ökologischen Funktionen und Strukturen (ergänzt nach WOOLSEY et al. 2005, S. 22).

RINGLER (1995, S. 232 in WULF 2001, S. 313) spricht neben „Renaturierung“ auch von „Naturierung“ und meint damit eine *„seit Menschengedenken naturfern genutzte Fläche auf Dauer den Selbstgestaltungskräften der Natur zu überlassen oder naturnah umzugestalten.“* Wichtig dabei ist in diesem Fall der Zusatz, dass kein spezifischer Zustand angestrebt wird. Zwar macht das die Bewertung des „Naturierungsvermögens“ schwer, da ja ein definierter Zielzustand fehlt, andererseits ist eine „Naturierung“ immer möglich (vgl. WULF 2001). Auch wenn der Begriff meist in Zusammenhang mit einer vegetativen Behandlung im Zuge landschaftsgärtnerischer Tätigkeiten gebraucht wird, sollte der Gedanke der „freien Entwicklung“ auch auf die Maßnahmen an Fließgewässer übertragen werden.

Vielleicht ist gerade diese Selbstentfaltung ein weiterer Grund, warum für den individuellen Charakter eines FG auch eine „persönliche“ Definition von Renaturierung erfolgen muss, will sie dem jeweiligen Gewässer gerecht werden. Damit wird vielleicht auch eine Antwort auf die von HAGEDORN (2002, S. 162) gestellte Frage *„Wir haben jetzt die Chancen, Flusssysteme durch Eingriffe wieder zu ändern – wohin aber zu ändern?“* geboten.

→ Zum Teil gibt es keine einheitlichen Definitionen von Begriffen oder die Vorstellungen von der Idee, dem Gedanken der Renaturierung, sind unterschiedlich. Wie bereits erwähnt, hat Renaturierung oftmals mehr mit Wertvorstellungen als mit Naturwissenschaften zu tun (vgl. DÜCHS 2014).

1.3.4 Leitbild und Entwicklungsziele bei und konkret für dieses Renaturierungsvorhaben

Im folgenden Absatz soll das Leitbildkonzept und die Festlegung von Entwicklungszielen bei Renaturierungsvorhaben vorgestellt werden, um im Anschluss das für die Dynamisierung der Donauauen aufgestellte Entwicklungsziel besser beurteilen zu können. Vor der Planung einer Renaturierung von Auen sollten die Standortbedingungen der Aue wie Boden, Relief und das jeweilige Wasserregime sowie der idealtypische Zustand, das Leitbild, bekannt sein (HENRICHFREISE 2007A). Erst die Kenntnis der jeweiligen projektspezifischen Voraussetzungen ermöglicht eine Ableitung eines geeigneten Entwicklungszieles.

Leitbilder sind zweifelsfrei wichtige Planungsinstrumente für Entwicklung und Gewässerbewirtschaftung. Der Begriff ist jedoch, wie schon bei der Renaturierung, je nach Sichtweise sehr unterschiedlich in Gebrauch. Zwei wichtige Interpretationen sollen hier gegenübergestellt werden. Im ursprünglichen Sinne wird als Leitbild häufig ein idealisierter potentiell-natürlicher Zustand verstanden. Dies bedeutet ein aus naturwissenschaftlicher Sicht maximal mögliches Sanierungsziel, das keine sozio-ökonomischen Einschränkungen berücksichtigt. Der heutige, potentiell natürliche Zustand ist definiert als der Zustand, der sich nach Aufgabe der anthropogenen Nutzungen und Entnahme von Verbauungen in und am Gewässer und seiner Aue einstellen würde (HERRMANN 2001, MUNLV 2003, LFU 2013A). Eine realistischere Definition wäre (ist), das Leitbild als Entwicklungsziel zu verstehen, in dem eventuell konkurrierende Nutzungsansprüche (z. B. Wasserkraft, Hochwasserschutz) bereits mit berücksichtigt werden (TRÄBING 1996, MUNLV 2003). Beim Entwicklungsziel geht es um eine maximal erreichbare Annäherung an den natürlichen Zustand unter Berücksichtigung sozio-ökonomischer Bedingungen und Abwägungen von gesellschaftspolitischen Randbedingungen, damit ist es letztendlich ein bzw. das realistische Planungsziel.

Für das Projektgebiet wurden von HERRMANN (2001, S.11) im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung folgende Entwicklungsziele definiert, die an unveränderliche Rahmenbedingungen (Wasserkraftnutzung, Hochwasserschutz und Landnutzung) gebunden sind:

- möglichst ungehinderte Ausleitung von Hochwassern in die Aue, d.h. Rückbau von Uferschutzbauten bzw. Dämmen
- Dynamisierung der Wasserstände durch variable Stauziele, vor allem auch Erzielung niedrigerer Wasserstände
- verstärkte Vernetzung von Aue und Fluss durch Öffnung von Flutrinnen und Altwässern zur Donau und Förderung deren Durchgängigkeit in der Aue
- Förderung von Niedrigwasserständen und
- damit Dynamisierung der Grundwasserverhältnisse
- Aktivierung morphodynamischer Prozesse durch verstärkte Durchströmung von Auengewässern
- Förderung der Entstehung von Pionierstandorten

- Förderung der typischen Lebenswelt von Auen mit stark schwankenden Wasserständen
- Wiederherstellung der Durchgängigkeit von Aue und Fluss durch Bau eines (oder mehrerer) möglichst viel Wasser führenden/r Umgehungsgewässer/s
- Einrichtung von beruhigten Altwasserbereichen ohne Nutzung
- Durchführung nötiger Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen auf den Brennen, Einführung einer nachhaltigen Pflege (Schafbeweidung), Vernetzung
- Extensivierung landwirtschaftlicher Flächen zumindest im unmittelbaren Kontakt zu Auen und Brennenbereichen
- Erzielung möglichst naturnaher Auwald-Bestände mit großen Umtriebszeiten, einzelstammweiser Nutzung oder gar von Naturwaldparzellen.

→ Es existiert ein Spannungsfeld zwischen Entwicklungszielen und tatsächlicher Umsetzung, da sich beide, entweder durch verschiedene Denkweisen der Akteure oder natürlicherweise ausschließen können.

In diesem Zusammenhang fordert BORCHARDT (1996) eine „ökologische Gewässerbewirtschaftung“, in der zum Teil interdisziplinäre Erkenntnisse neu kombiniert werden müssen. Dabei definiert er die ökologische Wasserwirtschaft als eine

„Bewirtschaftung von Oberflächengewässern unter ökologischen, technischen und sozioökonomischen Gesichtspunkten im Hinblick auf deren nachhaltige Entwicklung, indem sie Methoden und Instrumentarien sowie Erkenntnisse und Ergebnisse ingenieur- und naturwissenschaftlicher Einzeldisziplinen des Wasserwesens integriert. Wesentliches Merkmal ist eine Lösungs-, Handlungs- und Praxisorientierung.“
(BORCHARDT 1996, S. 20)

Auch wenn heute neben „dem ‚klassischen Wasserbau‘ – konkret und ideell – ein ökologisch orientierter Wasserbau“ (BAYERL 2012, S. 20) existiert, herrscht zumeist noch der von PARODI (2008) als „Massivwasserbau“ bezeichnete vor. Dem gegenüber steht der naturnahe Wasserbau, der darauf abzielen sollte,

„Diversität und Dynamik (technisch) am Gewässer zu verwirklichen. [...] Statt eines einheitlichen, mechanischen Kontinuums wird am ökotechnischen Gewässer eine kontextgebundene Vielheit an regionaltypischen, morphologischen und biologischen unterschiedlichen Gewässerabschnitten erkannt und erstrebt. Kein monotones Kontinuum, sondern ein manigfaltiges vernetztes Diskontinuum an Gewässerabschnitten wird hergestellt“ (PARODI 2008, S. 203).

→ Wasserbau heute ist meist noch zu sehr am klassischen Wasserbau orientiert. Eine Verschiebung der Schwerpunkte und das Arbeiten mit den Naturkräften hat noch nicht ausreichend stattgefunden. „Vielmehr muss der Flußbauer zum Gewässermorphologen ausgebildet werden“ (SCHERLE 1999, S. 5).

1.3.5 Renaturierungsprojekte und Monitoring

Die Vielzahl der bereits durchgeführten Projekte und Maßnahmen an FG und Auen ist kaum überschaubar, Empfehlungen müssen mühsam zusammengetragen werden und konkrete Aussagen fehlen. Die vom Bundesamt für Naturschutz beauftragte Studie „Erfassung überregional bedeutsamer Projekte zur Auenrenaturierung und zur Wiederherstellung von Überschwemmungsflächen – bundesweite Übersicht“ bezieht sich im Wesentlichen nur auf die 79 Flussauen im Auenzustandsbericht. Mit 265 Projekten wird dennoch ein erster Überblick zum derzeitigen Umsetzungsstand für Deutschland ermöglicht, zudem ist die Erfassung noch nicht abgeschlossen (EHLERT 2012).

In der ersten Version des Auenprogramms Bayern sind bisher 120 Projekte aus ganz Bayern erfasst (LFU 2015A). Eine zusammenfassende Auswertung zeigt aber schon, dass deutliche Verbesserungen bzgl. Lebensraum, Durchgängigkeit und im Hinblick auf das Landschaftsbild erreicht werden konnten, jedoch Defizite im Abflussgeschehen, der Eigenentwicklung und dem Flächenumfang bestehen bleiben (LFU 2015A).

Hinsichtlich der ökologischen Wirksamkeit von Renaturierungsmaßnahmen existiert kein gesicherter und aktueller Überblick, das Kosten-Nutzenverhältnis bleibt unklar und durch die Anpassung an diverse Nutzungsinteressen entstehen fragwürdige Umsetzungen (DICKHAUT et al. 2006). Zudem ist eine systematische Untersuchung der Kosten und der Kostenwirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur noch am Anfang (GOEBEL 2006).

→ Ein weiteres Problemfeld, neben der Vielzahl von unterschiedlichsten Projekten, die eine gemeinsame Auswertung erschweren, ist die Tatsache, dass eine isolierte Betrachtung von Maßnahmen meist nicht möglich ist.

Der sicherlich schwerwiegendste Fehler bei der Umsetzung von Maßnahmen ist das fehlende Monitoring und die Erfolgskontrolle. Dies lässt sich auch über die Grenzen Deutschlands hinaus verfolgen (BASH & RYAN 2002, BERNHARDT et al. 2005, PALMER et al. 2005, 2007). Im Idealfall wird, wenn ein Monitoring erfolgt, das Untersuchungsdesign nach der BACI-Methode (Before-After-Control-Impact-Design) nach UNDERWOOD (1991) vorgeschlagen (vgl. auch STEWART-OATEN et al. 1986), welches dann mit einem Referenzabschnitt vier separate Untersuchungen umfasst.

Viele Untersuchungen in Deutschland verdeutlichen, dass nur ein sehr kleiner Teil einer Erfolgskontrolle unterzogen wird. Die meisten Projektträger scheuen hohe Kosten und verweisen auf staatliche Monitoringsprogramme, wie sie im Zuge der WRRL durchgeführt werden, die aber nur eingeschränkt zur Bewertung geeignet sind (DAHM et al. 2014). Die Studie „Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihre Erfolgskontrolle“ (DAHM et al. 2014) liefert mit über 12.000 Messstellen in der Projektdatenbank und weiteren Produkten hilfreiche Informationen und Materialien für künftige Projekte, um diesem Defizit entgegenzuwirken.

→ Bei vielen Maßnahmen fehlt das begleitende Monitoring und eine tatsächliche Erfolgskontrolle.

1.3.6 Anlage von naturnahen Umgehungsgewässern

Neben Renaturierungsmaßnahmen wie Deichrückverlegungen und Reaktivierung von Primärauen werden insbesondere zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit neue Umgehungsbäche angelegt. Im DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.) Merkblatt 509 (DWA 2014) wird der Stand der Wissenschaft und Technik zu Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbaren Bauwerken präsentiert. Ein Umgehungsgerinne wird hier als Anlagentyp bezeichnet, mit dem ein Querbauwerk mit einem fischpassierbaren Gerinne weitläufig umgangen wird, ohne die wasserwirtschaftliche Funktion des Staubauwerks zu beeinflussen. Es lassen sich Angaben zu Funktionsprinzip, Gestaltung, Gerinnequerschnitt und der Ein- und Auslaufgestaltung finden. Eine Übersicht zu zahlreichen Umgehungsgewässern verschiedener Länder ist bei KAUFMANN (2012) zu finden (siehe Anhang 1-1).

Während bei regulierten, bereits bestehenden Gewässern inzwischen mehr auf eigendynamische Entwicklung gesetzt wird, kommt es beim Bau von Umgehungsgewässern zu aufwändiger Planung und dem Bau von künstlichen Mäandern (DICKHAUT et al. 2006). Aufgrund von diversen Einschränkungen können eigendynamische Prozesse meist nur abschnittsweise zugelassen werden (DWA 2014). Eine naturnahe Bauweise wird aber empfohlen, um eine möglichst große Strukturvielfalt zu erzielen.

Dabei sollte die Sohle der Umgehungsgerinne aus Kiessubstraten aufgebaut werden. Um die Laichplatzfunktion längerfristig zu erhalten, sind u. U. Unterhaltungsmaßnahmen notwendig (SEIFERT & HARTMANN 1995). In funktionsfähigen FG führt die Umlagerung von Material zu vielfältigen Sohl- und Uferstrukturen, diese kann sich aber in Abhängigkeit unregelmäßig auftretender Überflutungen auch auf die umgebende Aue erstrecken und führt dort zu stetiger Veränderung der morphologischen Verhältnisse (JÜRGING & PATT 2005, DICKHAUT et al. 2006).

Kennzeichen für die ökologische Funktionsfähigkeit naturnaher Gewässerlandschaften sind nach REY (2004) und DWA (2010B) (siehe auch Abb. 1-5):

- Verbundenheit von FG und angrenzender Aue
- Ausreichende Dynamik des Abflussgeschehens und Umlagerung von Geschiebematerial
- Durchgängigkeit
- Vielfalt unterschiedlicher gewässertypischer Strukturen für verschiedene Lebensgemeinschaften
- Individueller Charakter eines Gewässers, der durch das Einzugsgebiet bestimmt wird



Abb. 1-5: Abiotische und biotische Charakteristika zur Erfassung der ökologischen Funktionsfähigkeit von Fließgewässern (REY 2004, S. 17).

Mit diesen Kennzeichen werden die Ziele einer modernen, ökologisch orientierten Gewässerunterhaltung umschrieben, die inzwischen durch die WRRL auch gesetzlich vorgeschrieben ist (vgl. DWA 2010B). Besonders die dynamische Gewässerentwicklung, welche als „Selbstrenaturierung“ des Gewässers verstanden werden kann, lässt sich über morphologische Prozesse und Formen beschreiben. Diese sind z. B.:

- Laufentwicklung, Sinuosität
- Längsprofilentwicklung, Riffle-Pool-Sequenzen
- Kiesinseln und Uferbänke
- Querprofilentwicklung, Variabilität im Breiten-Tiefen-Verhältnis
- Sohlstruktur, vielfältige und unterschiedliche Korngrößenzusammensetzung
- Uferstruktur, naturnaher Bewuchs mit standortgerechten Gehölzen

Diese und weitere wichtige Faktoren, die zu einem natürlichen Zustand bei kleinen bis mittelgroßen Gewässern beitragen, können nach OTTO (1996, in ZERBE & WIEGLEB 2009) als Regenerationsfaktoren bezeichnet werden. Zu ihnen zählen:

- Krümmungserosion (wechselseitige Ufererosion, die zu zunehmender Laufkrümmung führt)
- Sturzbäume, Totholzansammlungen und Verklausungen, die die natürliche Längsprofilgliederung durch Bänke, Furten, Schnellen und Kolke induzieren
- Breitenerosion (beidseitige Ufererosion, die das Querprofil breiter und flacher werden lässt)
- Körnungsselektion und Bankbildung (getrennte Sedimentation von Grob- und Feingeschiebe, Bildung von regelmäßigen Querbänken)
- Natürliche Ansiedlung von Ufergehölzen, natürliches Altern und Umstürzen der Uferbäume

→ Kennzeichen für die Funktionsfähigkeit von Fließgewässern sind bekannt, aber Prognosen zur eigendynamischen Entwicklung und Formulierung von Mindestanforderungen können nicht zufriedenstellend gemacht werden oder bleiben zu vage.

2. THEORIEN, MODELLE UND METHODEN DER FLUVIALMORPHOLOGIE

2.1 Das fluviale System

Ein natürlicher Fluss, als System betrachtet, ist „offen, dynamisch und komplex“, ein naturnaher Fluss hingegen zeigt sich „unberechenbar-chaotisch“ (vgl. BUBENZER 2001, STEINHARDT ET AL. 2011). Unberechenbar oder chaotisch sind selbstverständlich nicht nur vom Menschen naturnah angelegte und gesteuerte Gewässer, aber gerade die Bedingungen, von denen ein gesteuertes System abhängt, sind auch immer durch subjektive Entscheidungen beeinflusst und damit keinesfalls leicht(er) zu bestimmen.

Systemtheoretisch kann ein FG als ein offenes System mit diversen Zu- und Abflüssen verstanden werden. Dynamisch ist es, weil auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen Entwicklungen mit langfristigen Selbstorganisations- und Anpassungsprozessen stattfinden. Die Komplexität wird durch die Wechselwirkungen und Anzahl von biotischen und abiotischen Elementen und Strukturen im und um das Fließgewässer herum bestimmt. Ein Gewässer hat das Bestreben, einen dynamischen Gleichgewichtszustand zu erreichen. In der Geomorphologie können nach CHORLEY und KENNEDY (1971) und SCHUMM (1977) vier Gleichgewichtsbegriffe (a) abfallend, (b) abfallend dynamisch, (c) gleichförmig stationär (steady state) und d) statisch) unterschieden werden (Abb. 2-1).

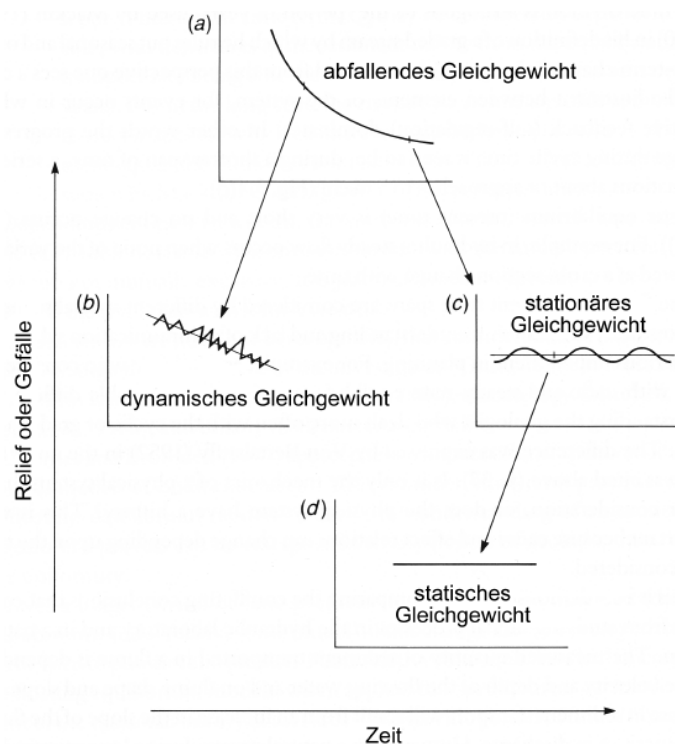


Abb. 2-1: Gleichgewichtszustände in der Geomorphologie nach SCHUMM (1998 in HARNISCHMACHER 2002, S. 12).

Die oft beschriebene Linearität besteht nur im Längsverlauf, nicht aber in den Reaktionen; diese sind eher sprunghaft und plötzlich und nicht selten führt eine Störung zu einem neuen oder anderen Zustand. Solch instabilen Zustände werden schematisch in der Abbildung 2-2 dargestellt.

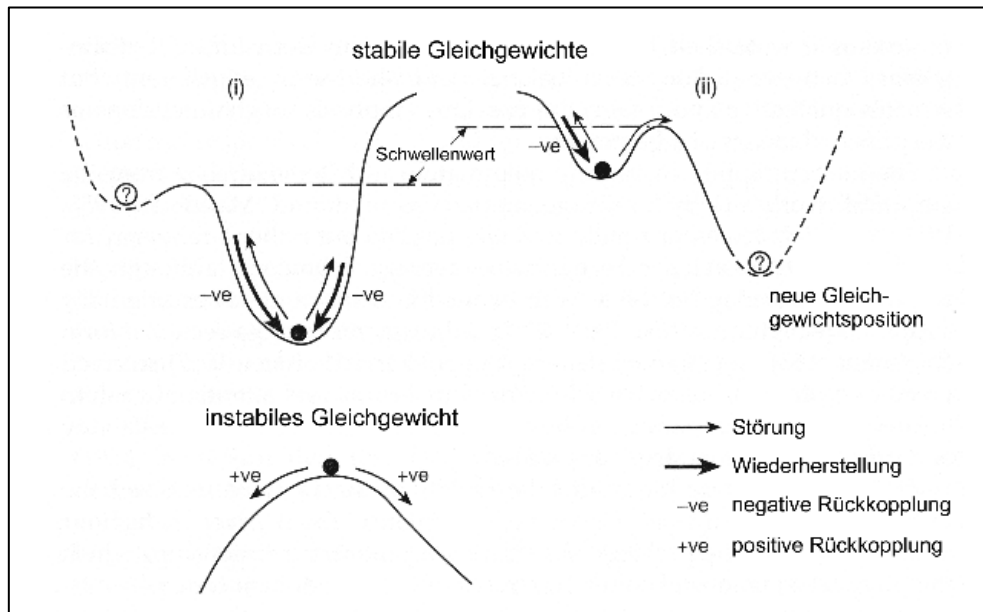


Abb. 2-2: Stabile und instabile Gleichgewichtszustände (schematisch) nach KNIGHTON (1998 in HARNISCHMACHER 2002, S. 17).

Über diese recht physikalisch-systemtheoretische Betrachtungsweise hinaus hat jedes Fließgewässer seinen eigenen Charakter entwickelt. Heute ablaufende Prozesse und die daraus resultierenden Formen werden neben den aktuell wirkenden Einflussgrößen auch von vorzeitig entstandenen Formen beeinflusst. Nach BUBENZER (2001) können bis zu sechs Faktorenkomplexe unterscheiden werden, die seit der letzten Eiszeit in Flussauen zu Veränderungen geführt haben:

- a) große Klimaschwankungen
- b) Wiederbewaldung und Bodenentwicklung
- c) sekundäre, untergeordnete Klimafluktuationen im Holozän
- d) Hebungen und Senkungen in tektonisch instabilen Regionen
- e) anthropogene Entwaldung, Landnutzung und Besiedlung
- f) bewusste Einflüsse durch menschliche Aktivitäten

Seit dem Ende der letzten Eiszeit wurde die Vegetations- und Landschaftsentwicklung Mitteleuropas von zunächst klimatischen, edaphischen sowie tektonischen Entwicklungsprozessen bestimmt, bis dann ab dem 6. Jahrtausend v. Chr. auch anthropogene Einflüsse eine entscheidende Rolle spielten (POTT & REMY 2000, HEINE 2001).

Die Problematik bei einer wissenschaftlichen Betrachtung des fluvialen Systems ergibt sich somit aus der Vielzahl der Parameter (vgl. SCHUMM 1977) und der Variabilität der Einzelparameter, sowie der Komplexität der raum-zeitlichen Prozesszusammenhänge. Verschiedene Konzepte erleichtern aber die Orientierung bei der Auseinandersetzung mit FG als Forschungsgegenstand. Sie reichen dabei von den Kleinstformen angefangen, bis zum Einzugsgebiet.

Fließgewässer sind zunächst hierarchisch organisiert (vgl. FRISSELL et al. 1986, KERN 1994) und reagieren auf Veränderungen unterschiedlich. Die Abbildung 2-3 stellt die unterschiedlichen Skalen und Betrachtungsebenen der FG und die zeitliche Entwicklung diverser Gewässerstrukturen heraus (vgl. Abb. 3-7, Kapitel 3).

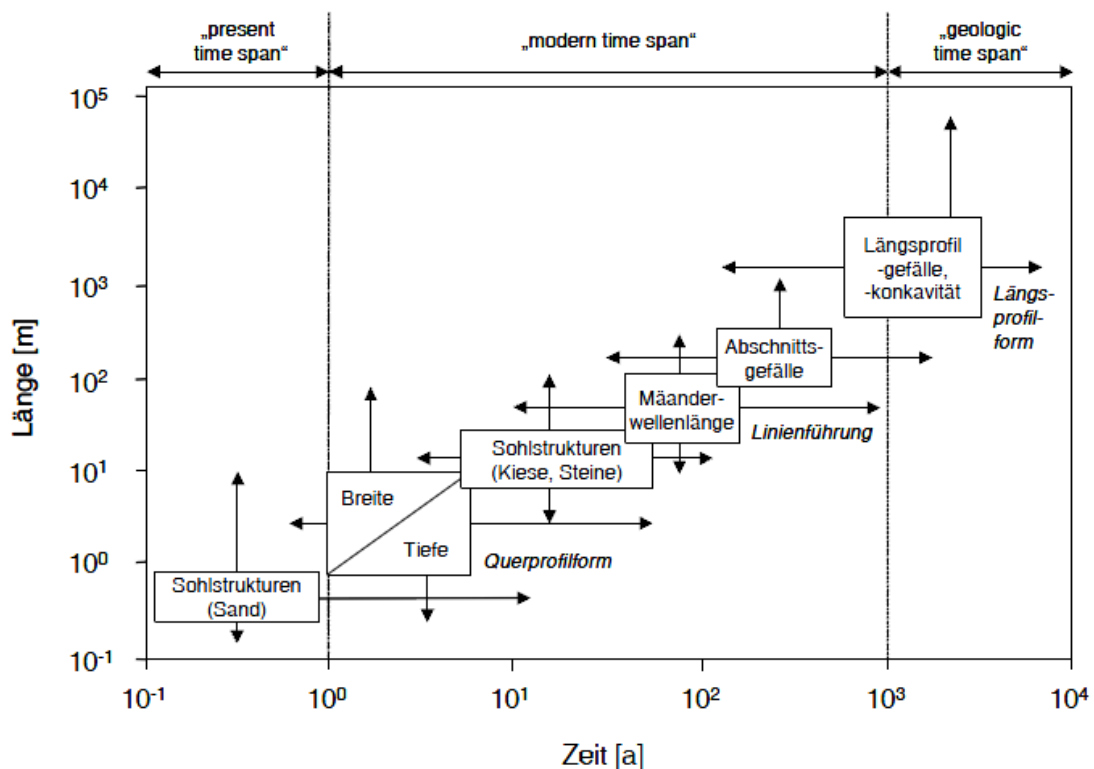


Abb. 2-3: Gewässerstrukturen im Raum-Zeit-Bezug nach KERN (1994 in HARNISCHMACHER 2002, S. 10).

Sowohl natürliche, als auch vom Menschen angelegte Fließgewässer werden im Wesentlichen von den Verhältnissen im Einzugsgebiet geprägt. Die naturräumlichen Gegebenheiten – vom Oberlauf zum Unterlauf – durch Klima, Geologie, Tektonik, Relief, Boden und Vegetation gesteuert, nehmen Einfluss auf den Oberflächenabfluss im jeweiligen Abschnitt oder Segment (MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980).

Nach SCHUMM (1977) können diese allogenen (externen) Variablen oder Steuerfaktoren zu den unabhängigen Faktoren, „upstream controls“, gerechnet werden, die dann entsprechend in den Unterläufen in die „downstream controls“ übergehen.

Als abhängige Variablen werden diverse, insbesondere hydrologische und geomorphologische Größen wie Fließgeschwindigkeit und Flussbettgeometrie angesehen (SCHUMM 1977, BULL 1991, GREGORY & DAVIS 1992, KNIGHTON 1998). Variablen, die die Form des Gerinnes prägen und von ihr selbst unabhängig sind, können als Steuergrößen, die abhängigen Variablen als Zielgrößen bezeichnet werden (Abb. 2-4). KNIGHTON (1998) hat die Steuergrößen in Abhängigkeit von ihrem unterschiedlichen Raum- und Zeitbezug in mittelbar und unmittelbar wirkende Variablen unterschieden. Die im unteren Teil der Abbildung genannten abhängigen Variablen werden als Zielgrößen bezeichnet und beschreiben die Morphologie des Gerinnebetts. Ihnen wird in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

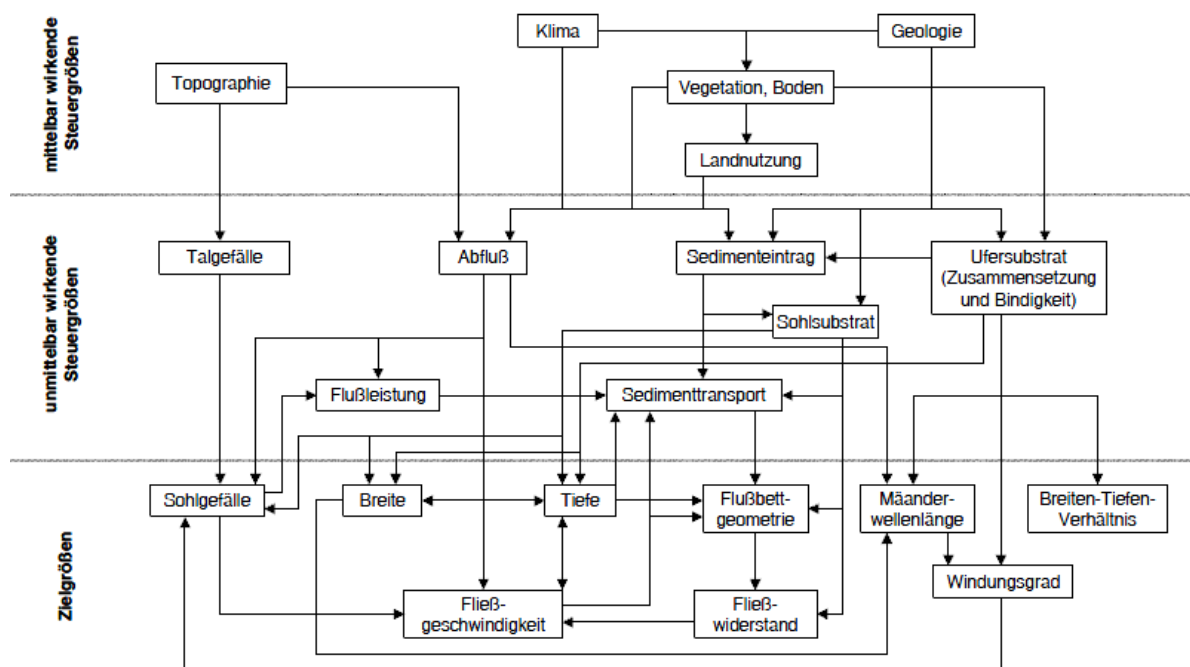


Abb. 2-4: Fluvialmorphologische Steuer- und Zielgrößen mit ihren einseitigen- und wechselseitigen Beziehungen (Pfeile) nach KNIGHTON (1998 in HARNISCHMACHER 2002, S. 7).

Abfluss, Strömung und Fließkräfte sind im Fließgewässer die bestimmenden Lebensraumgrößen (MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980, JUNGWIRTH et al. 2003). Neben den Arten und Lebensgemeinschaften und der chemisch-physikalischen Gewässerqualität gibt es noch weitere ökosystemrelevante Kompartimente (Bausteine) (JÜRGING & PATT 2005, PATT et al. 2011) sowie Prozesse, die bei der Entwicklung von Fließgewässern entscheidend sind. Viele davon stehen in enger Beziehung zueinander und beeinflussen sich über diverse Rückkoppelungsprozesse (Abb. 2-5) gegenseitig (FISCHER & CYFFKA in press). Im UG sind dies:

- das Abflussgeschehen mit seiner Dynamik (Donau und Ottheinrichbach, aber auch andere FG), d.h. die jahreszeitliche Verteilung des Abflusses, das Abflussregime mit den Extremwerten, Fließgeschwindigkeiten und Strömungsmustern. Die Wasserhältnisse in der Aue (Dynamik und Überschwemmungen bei/durch ÖF).

Darin eingeschlossen sind auch die Vernetzung von Wasser und Land über die hyporheische Zone (Grundwasserdynamik) und die Veränderung der Bodenfeuchte.

- der Feststoffhaushalt, mit dem an das Abflussgeschehen gebundenen Sedimenttransport, die Wechselwirkung zwischen Erosion-Transport-Akkumulation, die Sedimentation von Feinmaterial in der Aue.
- die Morphologie des Gewässers (Linienführung, Tiefen- u. Breitenvariation, Längs- u. Querprofilentwicklung, Struktur und Substrat des Flussbettes, Gewässerstruktur) und das Auenrelief (Böden, Altwässer, Terrassenkörper, Flutrinnen), das in Abhängigkeit von Abfluss und Feststoffhaushalt kontinuierlich mehr oder weniger starken Veränderungen unterworfen ist.

Weitere wichtige Faktoren, die den Zustand eines FG oder einer Aue beeinflussen, sind die unterschiedlichen Nutzungen innerhalb der Gewässerlandschaft und im direkten Umland sowie der rechtliche Rahmen. Vor allem bei neu angelegten FG entscheiden oder bestimmen diese anthropogenen Faktoren maßgeblich die Entwicklungsfähigkeit des Systems.

Auch in Auen ist der bestimmende Faktor das Wasser (GERKEN et al. 1988, DISTER 1991, SCHOLZ et al. 2005). Verschiedene Prozesse innerhalb der Auen führen zu einer permanenten Veränderung und Neubildung von Lebensräumen. Dies ist auch der Grund für die Entwicklung von diversen Übergangsformen zwischen den drei Gewässertypen: Fließgewässer, Stillgewässer und ephemere (temporäre) Gewässer. Zuletzt genannte, wie Flutmulden und Auentümpel, die nur bei Hochwasser und ÖF durchflossen bzw. geflutet werden und bei zurückgehendem Abfluss wieder trocken fallen, reagieren zum Teil sehr unterschiedlich. In durchflossenen Gerinnen ändern sich Fließgeschwindigkeiten, Strömungsbilder und -richtungen, so dass Erosion und Sedimentation unterschiedlich stark wirken. Das Zusammenwirken von Abfluss, Sediment und der Ausbildung von Lebensräumen wird von FISCHER und CYFFKA (2013A) schematisch mit ineinandergreifenden Zahnrädern symbolisiert (Abb. 2-5).

Nach einer Störung des Systems (durch beispielsweise ein Hochwasser) sind mehrere Szenarien denkbar. Ob es innerhalb des fluvialen Systems bzw. der Aue zur Anpassung nach einer Störung kommt, hängt auch von der internen Entwicklung eines Systems ab. So führt ein Wechsel externer Faktoren, z. B. eine Veränderung des Abflusses, nicht automatisch zu Reaktionen im fluvialmorphologischen System. Besonders dann nicht, wenn Grenzwerte (kritische Schubspannung) in Hinblick auf Erosion und Transport nicht erreicht werden (vgl. Abb. 2-2).



Abb. 2-5: Auen-Interaktion: Komponenten und Prozesse einer auentypischen Dynamik leicht verändert nach FISCHER und CYFFKA (2013A, S. 43).

Während in den meisten anderen Ökosystemen die Morphologie nur langsamen Veränderungen unterworfen ist, ist in (natürlichen) Auen eine ständige Veränderung der Geländeoberfläche zu beobachten. Dabei ist das Eintreten (räumlich und zeitlich) dieser Veränderung nur sehr schwer vorherzusagen.

Ein Prozess-Response-System oder Vorgangsreaktionssystem (vgl. AHNERT 2003) kann die komplexen Wirkungsbeziehungen im Fließgewässer und damit auch im Ottheinrichbach aufzeigen (Abb. 2-6). Geomorphologische Prozess-Response-Systeme sind oft durch Rückkopplungen gesteuert, die das Prozesssystem tendenziell in eine Art Gleichgewichtszustand überführen (CHORLEY & KENNEDY 1971, KNIGHTON 1998, AHNERT 1994, 2003). Dabei kommen selbstregulierende Eigenschaften zur Geltung, wodurch eine Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen möglich wird (gestrichelter Kasten Abb. 2-6). Durch manuelle Steuerung und technische Anlagen, wie sie bei Renaturierungsvorhaben in dicht besiedelten Landschaften notwendig sind, entsteht meist ein Ungleichgewicht, bzw. wird ein künstliches Gleichgewicht aufrechterhalten. Nach dem „System Approach“ von CHORLEY und KENNEDY (1971) kann von einem fluvial-geomorphologischem Kontrollsystem gesprochen werden, da zu dem Prozess-Response-System das menschliche Eingreifen in die Systembeziehungen zwischen Prozess und Form über Regelgrößen hinzukommt.

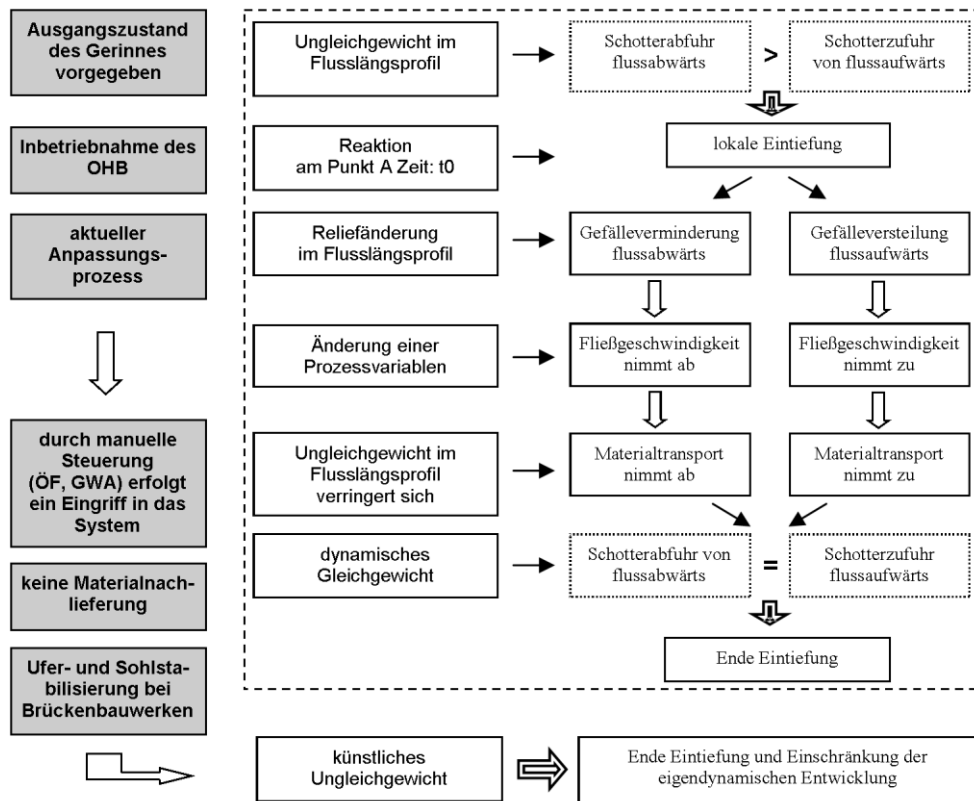


Abb. 2-6: Fluvial-geomorphologisches Kontrollsystem OHB: Schematische Darstellung eines Prozess-Response-System am Beispiel eines Flussbettes, nach AHNERT (2003, S. 32) (gestrichelter Kasten), ergänzt und angepasst auf das Umgehungsgewässer (OHB) im Projektgebiet.

Mehrmals wurde schon der individuelle Charakter, die hohe Komplexität, sowie die ererbten Ausgangsbedingungen eines FG angesprochen, die allesamt zu einer mangelnden Repräsentativität von Modellen und Einzelergebnissen führen (SCHUMM 1977, 1981, HOUBEN 2002). Beziehungen zwischen Prozessen und Formen sind nur selten eindeutig (GUMNIOR 2006). Demnach ist es leicht verständlich, dass sich generalisierte, analytische Konzepte, die innerhalb der fluvialmorphologischen Forschung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt wurden, bislang nicht in Form eines einzelnen allgemeingültigen Modells etablieren konnten. Vielmehr existiert ein Sammelwerk diverser quantitativer Ansätze (THORNES 1977, vgl. GUMNIOR 2006).

2.2 Fließgewässerökologische Konzepte

Während sich die fließgewässerökologische Forschung in Deutschland meist auf kleine, eher wenig belastete Bäche des Hügel- und Berglandes konzentrierte, standen in Nordamerika auch die großen Flüsse im Fokus (BORCHARDT 1996). Von einer linearen Betrachtungsweise im „River Continuum Concept“ (VANNOTE et al. 1980) erweiterte sich die Denkweise um vertikale und laterale Dimensionen, bevor dann etwa 1989 (vgl. WARD 1989) die Zeit, und mit ihr die Dynamik, Platz in der Fließgewässerbetrachtung fand. Jedoch werden die in der Grundlagenforschung erarbeiteten Konzepte erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung in der wasserwirtschaftlichen Praxis umgesetzt. Viele der in der Tabelle 2-1 aufgeführten

Konzepte sind allgemein akzeptiert. Für Renaturierungsvorhaben innerhalb von Auen ist das „Flood Pulse Concept“ von JUNK et al. (1989) entscheidend (vgl. MIDDLETON 1999) bzw. die Erweiterung um die „Flow Pulse“ bei Flüssen und Auen in den gemäßigten Klimazonen (TOCKNER et al. 2000). Mit der Ergänzung werden auch die kleineren Abflussschwankungen, die zeitlich entkoppelt von den Überschwemmungen bei Hochwasser ablaufen, berücksichtigt und hervorgehoben, da auch sie wesentlich die Interaktion und Austauschprozesse in Flusslandschaften beeinflussen können.

Tab. 2-1: Fließgewässerökologische Hypothesen und Konzepte mit ihrem wasserwirtschaftlichen Anwendungsbezug (verändert und ergänzt nach BORCHARDT (1996).

Grundlagen-Konzepte	Autoren	Dimension	Anwendungsbezug
Allgemeine biozönotische Gliederung, Kolonisationszyklus-Hypothese	ILLIES & BOTOSANEANU 1963, MÜLLER 1982	Longitudinal	Wiederbesiedlung durch die „Drift“
River Continuum Concept	VANNOTE et al. 1980		„Fluss-Kontinuum“
Nutrient Spiralling	NEWBOLD et al. 1982		Lineare Durchgängigkeit
Serial Discontinuity Concept	WARD & STANFORD 1983, 1995		Erweiterung über die Diskontinuitäten im Flussverlauf
Oberflächenwasser/Grundwasser- vernetzung Hyporheisches Interstitial	(ORGHIDAN 1959, BORCHARDT 1961)	Vertikal	Fluss-Grundwasser Interaktion
Ecotone Concept	FISHER & LIKENS 1973, WARD 1989, DÉCAMPS & NAIMAN 1990	Lateral	Land-Wasser-Vernetzung, Einheit von Fluss und Aue, Gewässerstruktur(güte)
Flood Pulse Concept	JUNK et al. 1989, JUNK & WANTZEN 2004, TOCKNER et al. 2000		Renaturierung
Hierarchical Organisation	FRISSELL et al. 1986	Raum Ebenen	Gewässerstruktur(güte)
River Scaling Concept	HABERSACK 2000		Verknüpfung biotischer und abiotischer Strukturen
Hydraulic Stream Ecology	STATZNER & HIGLER 1986, STATZNER et al. 1988	Zeit Dynamik	Restwasser, Mindestwasserführung
Disturbance Theory	CONNELL 1978, TOWNSEND 1989		Renaturierung
Patch-Dynamics Concept	PICKETT & WHITE 1985, TOWNSEND 1989		Gewässerstruktur

2.3 Ausgewählte Aspekte zur Fluvialmorphologie

Vor dem Hintergrund der Sekundärauenentwicklung und der Prozesse in naturnahen Umgebungsgewässern ist neben der bereits erfolgten groben Einordnung und systemtheoretischen Betrachtung im vorangestellten Kapitel eine weitere Betrachtung einzelner Themenbereiche sinnvoll. Dabei werden Einzelaspekte zum Forschungsgegenstand, die der Verfasser als besonders wichtig erachtet, herausgehoben, andere finden nur am Rande Erwähnung oder fallen ganz weg. Die folgende Zusammenstellung erhebt also keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit, dennoch soll sie dem Leser einen Überblick über die „Geschichte“ der Fließgewässerforschung ermöglichen und ihn dann mit dem erweiterten Grundlagenwissen durch die Arbeit begleiten.

2.3.1 Die Geschichte der Fließgewässerforschung

Mit dem Aufblühen der frühen Hochkulturen und dem Sesshaftwerden größerer Volksstämme beginnt auch die Beobachtung der Gewässer und ihrer Erscheinungsform (MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980). Nach LEONARDO DA VINCI (1452-1519), der zum ersten Mal den Zusammenhang von Abfluss, Gerinnequerschnitt und Fließgeschwindigkeit wissenschaftlich exakt beschrieben hat (vgl. BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996, SCHWOERBEL 1999), unterschied erst KIRCHER (1665) Erosions- und Ablagerungsstrecken. 1860 versuchte v. BAER in seinen Abhandlungen nachzuweisen, dass eine *„längst bekannte, aber rätselhaft erscheinende Tatsache, nämlich die steile Ausbildung des rechten und die flache Form des linken Ufers“*, sich aus der Erdrotation erklären lasse (MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980, S. 27). Selbst EINSTEIN (1926) beschäftigte sich dann später mit diesem Phänomen. Im ersten Band der „Morphologie der Erdoberfläche“ von PENCK (1894) werden insbesondere fluviale Prozesse ausführlich quantitativ behandelt. Die Flussuntersuchungen von HJULSTRÖM (1935) zeigen noch heute den Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Transportbeginn verschiedener Korngrößen. Im Jahr 1953 folgte die inzwischen klassisch zu nennende Arbeit von LEOPOLD und MADDOCK über die hydraulische Geometrie von Gerinnen und ihre morphologische Bedeutung. Sie legt den Grundstein für die gesamte seither entwickelte quantitative Morphologie von Gerinnebetten und zeigt den Zusammenhang von morphometrischen und hydraulischen Gerinneparametern.

Neben LEOPOLDS eigenen weiteren Arbeiten erhielten vor allem die Untersuchungen von WOLMAN (1955) und LEOPOLD und WOLMAN (1957) und die Forschungen des Strahler-Schülers SCHUMM (1960, 1968) Bedeutung. WOLMAN und MILLER zeigten 1960, in welcher Weise die Erosions- und Transportarbeit der Flüsse von der Größenordnung und Häufigkeit der Abflussereignisse abhängt. SCHUMM und LICHTY legten kurz darauf im Jahr 1965 in einem Aufsatz über Zeit, Raum und Kausalität in der Geomorphologie die Bedeutung des räumlichen und zeitlichen Betrachtungsmaßstabes für die Interpretation dar.

Den wohl aktuellsten Überblick über die Geschichte der Fließgewässerforschung liefert (WOHL 2014) mit dem im letzten Jahr erschienen Artikel *„Time and the rivers flowing: Fluvial geomorphology since 1960“*.

2.3.2 Gerinnegrundrissformen

In der Flussmorphologie werden seit 1957 (LEOPOLD & WOLMAN 1957) drei Grundrissformen unterschieden: „straight“, „meandering“, „braided“ (gerade, mäandrierend und verzweigt) (Abb. 2-7). Ergänzend bringt die Natur diverse Übergangs- und Mischformen hervor, wie z. B. die verzweigten Flüsse mit einzelnen, wiederum mäandrierenden Teilgerinnen und Inseln (anabranching rivers). Unter ihnen sind auch die in eher stabilen Uferbänken ausgebildeten anastomosierenden Flüsse (low energy) einzuordnen (vgl. NANSON & KNIGHTON 1996). Dies ist auch der Grund, warum es in der Literatur immer wieder zu widersprüchlichen Bezeichnungen und Übersetzungen kommt. „*In summary, present terminology is confusing and there is no consensus on how to incorporate the size of alluvial islands in a useful definition of anastomosis*“ (MAKASKE 2001, S. 152).

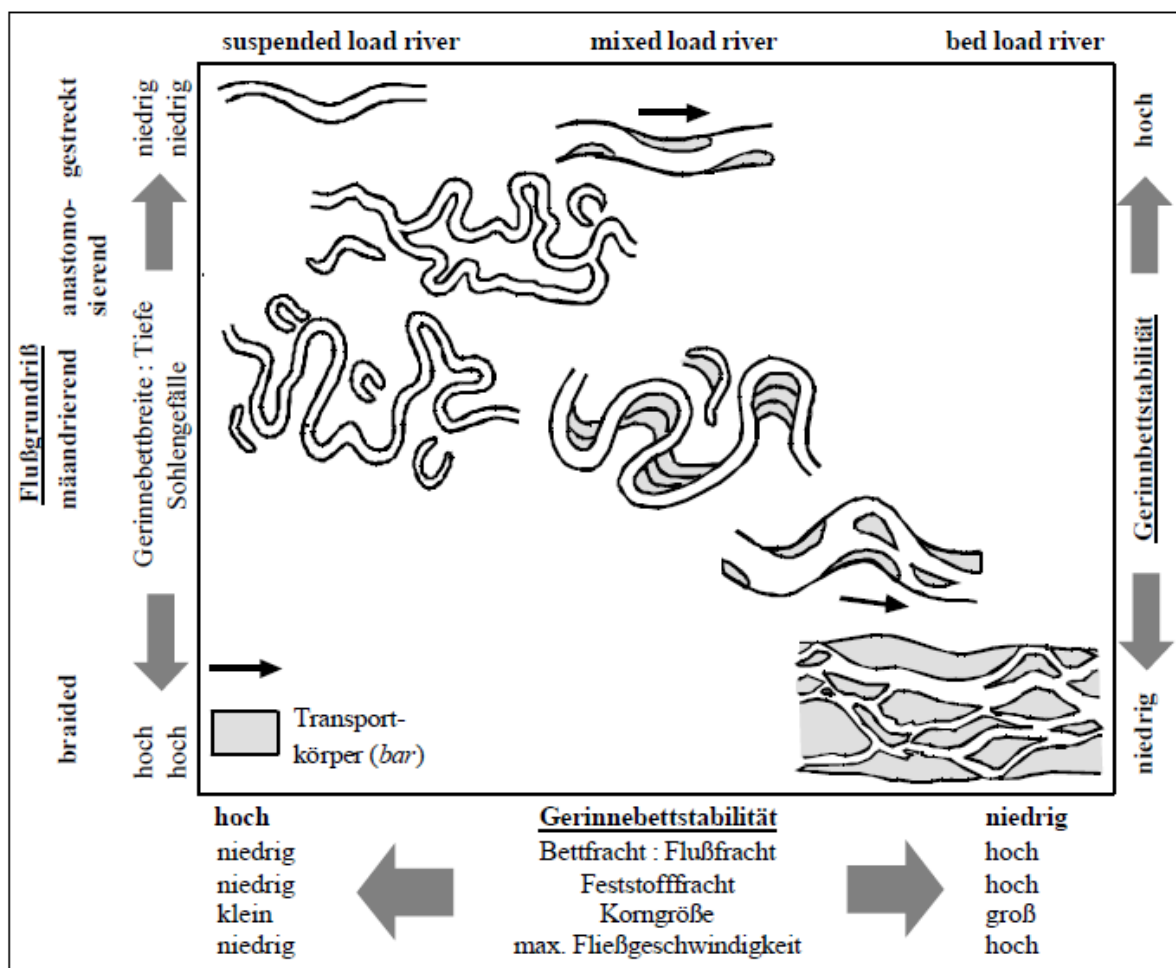


Abb. 2-7: Gerinnegrundriss und steuernde Prozessvariablen (HOUBEN 2002, S. 24, verändert nach SCHUMM 1985).

Die Ausbildung oder Entwicklung der Gerinnegrundrisse lässt sich nach YALIN (1992 in MARTI 2006) und YALIN und DA SILVA (2001) mit horizontalen Turbulenzen erklären. Eine Vielzahl von weiteren Theorien sind in den Publikationen von MIALI (1996) und BROWN (1997) zu finden.

Das betrachtete Flusssystem fällt streng genommen in zwei unterschiedliche Kategorien – oder kann zumindest so betrachtet werden –, was nur bei einem Fluss möglich ist, der menschliche „Unterstützung“ erfahren hat. Zum einen ist der OHB ein „wiederhergestelltes Relikt“ und Teil eines früheren, im Englischen als „mixed-load laterally active anabranching“ bezeichneten Flusssystems mit einzelnen Teilgerinnen (anabranche = Seitenarm), die selbst mäandrieren und in gewissem Abstand zueinander liegen (NANSON & KNIGHTON 1996).

Zum anderen kann er, als eigenständiger Fluss betrachtet, den Mäanderflüssen bzw. dem Übergangsbereich hin zu den verzweigten Flüssen zugeordnet werden (siehe Kapitel 6.2.1). Im Zuge der Mäanderwanderung werden Prallhänge erodiert und das Material bereits am nächstliegenden Gleithang wieder abgelagert.

Zur Abgrenzung zwischen verschiedenen Formen haben sich Verfahren von LEOPOLD und WOLMAN (1957), PARKER (1976), JÄGGI (1983), ZARN (1997) und DA SILVA (1991) durchgesetzt, auf letztere wird in Kapitel 5.2.1 näher eingegangen.

Abschließend bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass die physikalischen Entstehungsursachen für Verzweigungen und Mäanderausbildungen bisher noch nicht vollständig erfasst sind (BECHTELER 2006).

2.3.3 Natürliche Gerinnebildung und Gleichgewichtsbreite

In einem natürlichen FG können sich der Gerinnequerschnitt und das Sohlgefälle in Abhängigkeit des Abflusses und der Geschiebeführung frei anpassen. Bei Gewässerbetten und natürlicher Gerinnebildung kann zwischen Sohl- und Ufererosion unterschieden werden, eine weitere Trennung kann zwischen primärer und sekundärer Ufererosion erfolgen (ANDERSON et al. 1975). Unter „primary bank erosion“ ist die natürliche Verbreiterung eines ehemals schmalen Profils zu verstehen, wobei das aufgeweitete Gerinne immer noch einen gestreckten Verlauf mit ebener Sohle aufweist (Abb. 2-8). Die Prozesse, die zur Bildung von Sohlundulationen und Verformungen im Querschnitt führen, welche die Ausbildung von verzweigten und mäandrierenden Strukturen fördern, werden als sekundäre Ufererosion bezeichnet (REQUENA 2008). Das Ergebnis ist auch ein im Gerinnegrundriss verändertes FG.

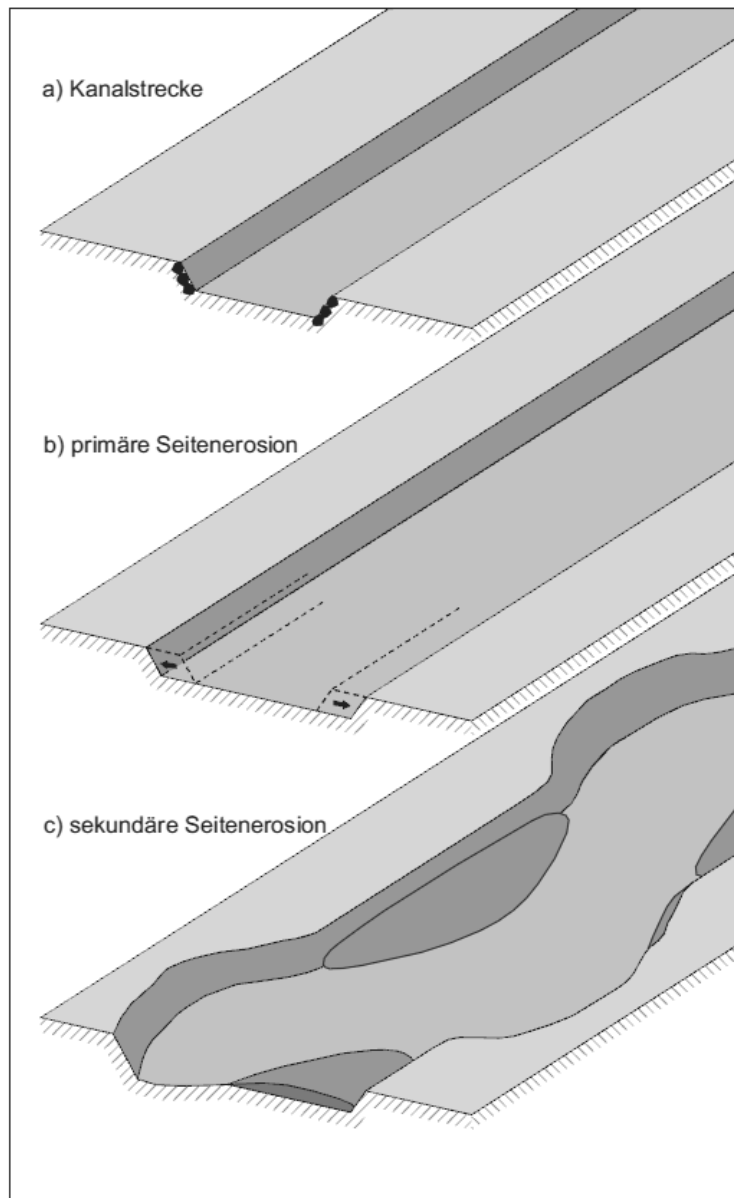


Abb. 2-8: Natürliche Gerinnebildung durch laterale Erosion (REQUENA 2008, S. 24).

In Modellversuchen konnte nachgewiesen werden, dass bei kleinen Sohlgefällen (0,3-0,4%) ein gerades Gerinne breiter wurde, aber dann stabil blieb (WOLMAN & BRUSH 1961, ACKERS & CHARLTON 1970 beide in REQUENA 2008).

In der Regime-Theorie (eine Methode zur Bemessung stabiler Flussgerinne) und der Erweiterung auf natürliche FG (Hydraulische Geometrie) wird ein Gleichgewichtszustand eines Gerinnes beschrieben, den ein Fluss bei natürlicher Entwicklung in seinem Alluvium erreicht. Dabei spielt die Breite des Gerinnes eine maßgebliche Rolle. Es wurden verschiedene Ansätze für die Berechnung der Gleichgewichtsbreite entwickelt, bei der ein Gewässer mit einem definierten Abfluss stabil bleibt (FAHNESTOCK 1963, PARKER 1979 in MARTI 2006, BRAY 1982, MOSLEY 1983 in MARTI 2006, YALIN 1992, ASHMORE 2001).

Per Definition kann das Gerinne nach Erreichen dieser Breite nicht mehr breiter werden, weshalb REQUENA (2008) von der Grenzbreite B_{Gr} bzw. Wasserspiegelbreite spricht, die sich z. B. in Form von unten aufgeführter Gleichung berechnet:

$$B_{Gr} = a \cdot Q^{0,45-0,60}$$

mit: B_{Gr} = Grenzbreite
 a = Konstante
 Q = Abfluss
 Exponent von Q variiert je nach Datensatz

Dabei variieren der Exponent vom Abfluss und die Konstante a von Untersuchung zu Untersuchung und es werden je nach Autor weitere Einflussfaktoren (Sohlmateriale, Vegetation, Gefälle etc.) berücksichtigt.

Im Fünf-Stadien-Modell von KELLER (1972) hängt die Ausbildung zu einem Mäander auch mit Unebenheiten der Gewässersohle und damit mit sich abwechselnden Riffle- und Pool-Strukturen, sowie seitlicher Erosion an den Uferbänken zusammen (Abb. 2-9).

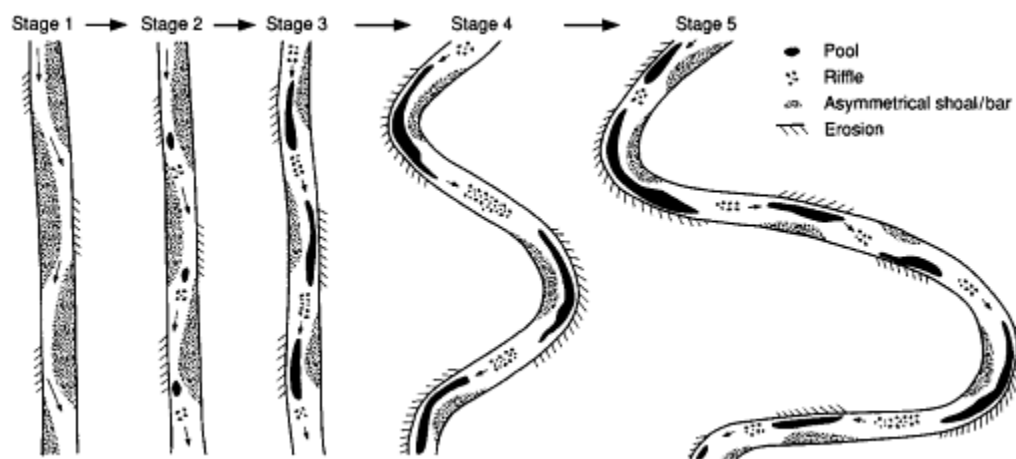


Abb. 2-9: Mäanderentwicklung und Seitenerosion nach KELLER (1972 in BROWN 1997, S. 70).

2.3.4 Mechanismen der Ufererosion

In einem FG kommt es zu verschiedenen Prozessen der Ufererosion. Diese wurden u.a. von HOOKE (1979), THORNE und TOVEY (1981), THORNE (1982), LAWLER (1993) und (LAWLER et al. (1999) untersucht und können generell in drei Kategorien eingeteilt werden:

- (1) Verwitterung und Schwächung des Ufers durch verschiedene Prozesse (sub-aerial)
- (2) direkte Strömungserosion (fluvial entrainment)
- (3) Massenbewegung an Böschungen (mass failure) (vgl. GROVE et al. 2013).

Im Folgenden sollen besonders die beiden letztgenannten Erosionsprozesse näher erläutert werden, da sie auch wesentlich zur Ausgestaltung des Ufers am OHB beitragen. Dabei ist es

hilfreich, das Ufer aus gewässermorphologischer Sicht als Fläche zu verstehen, die von der Gewässersohle und dem Auenniveau begrenzt wird.

Direkte Strömungserosion

Unter direkter Strömungserosion ist der Erosionsprozess zu verstehen, der durch fließendes Wasser und die Schubspannungsgeschwindigkeit charakterisiert ist. Im unteren Böschungsbereich treten die höchsten Schubspannungskräfte auf. Oft sammelt sich für kurze Zeit am Böschungsfuss und der Gewässersohle herabgestürztes oder gerutschtes Material. Bleibt nach Abtransport die dort angreifende Schubspannung kleiner als die Grenzscherung des in Kohäsion befindlichen Ufers, dann bleibt die Böschung stabil (SCHERLE 1999, REQUENA 2008). Wenn das Ufermaterial eine breite Korngrößenverteilung aufweist, dann werden die großen Korngrößen selten weitertransportiert und es bildet sich auf der Sohle eine Pflasterungsschicht.

Massenbewegung an Böschungen (Böschungsbruch)

Durch die bei der Strömungserosion verursachten lokalen Hangunterschneidungen kann es zur Erosion weiterer Böschungsteile bzw. zur Auslösung von Fragmenten kommen (REQUENA 2008). THORNE und TOVEY (1981) bzw. THORNE (1982) sprechen auch von gravitationsinduzierten Massenbewegungen. Nach THORNE (1982) können daraus unterschiedliche Versagensformen beschrieben werden (Abb. 2-10):

- Oberflächenrutschung
- Rotationsbruch
- ebener Gleitbruch
- Abbruch eines entstandenen Überhangs
- durch Spalten und Risse verursachter Gleitbruch

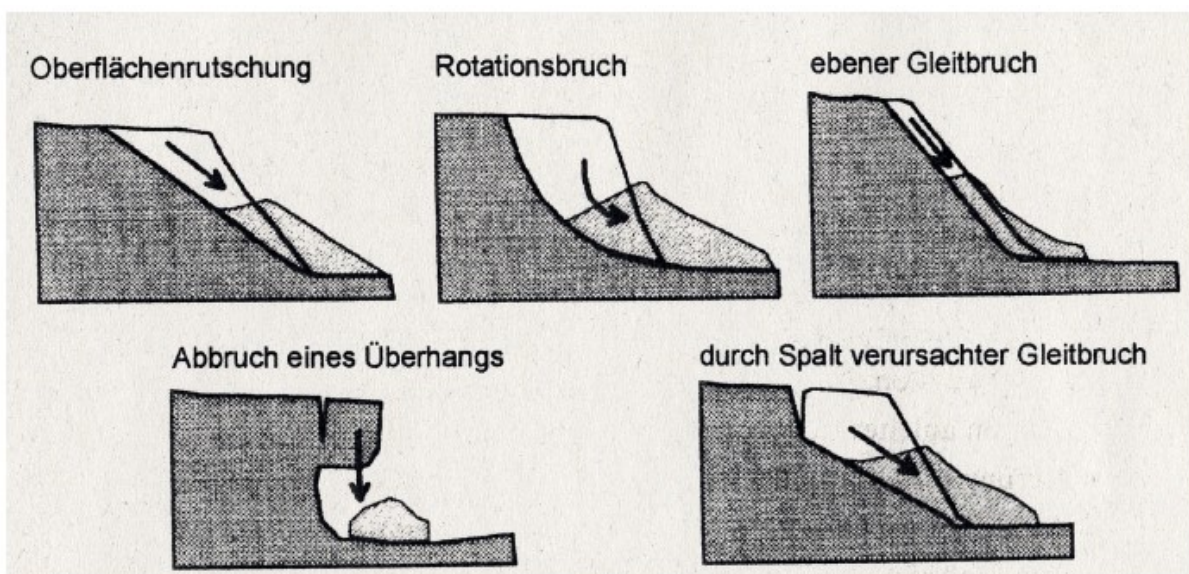


Abb. 2-10: Gravitationsinduzierte Versagensformen an Ufern nach THORNE (1982 in REQUENA 2008, S. 44).

Den Einfluss von Ufermaterial und Vegetation beschreibt neben OSMAN und THORNE (1988) auch (SCHERLE 1999). Weitere Beiträge liefern SIMON et al. (2000) und PARKER et al. (2008). Dabei hängt die Ausformung des Ufers von einer Reihe von Faktoren ab, von denen das Ufermaterial der maßgeblichste ist (Abb. 2-11).

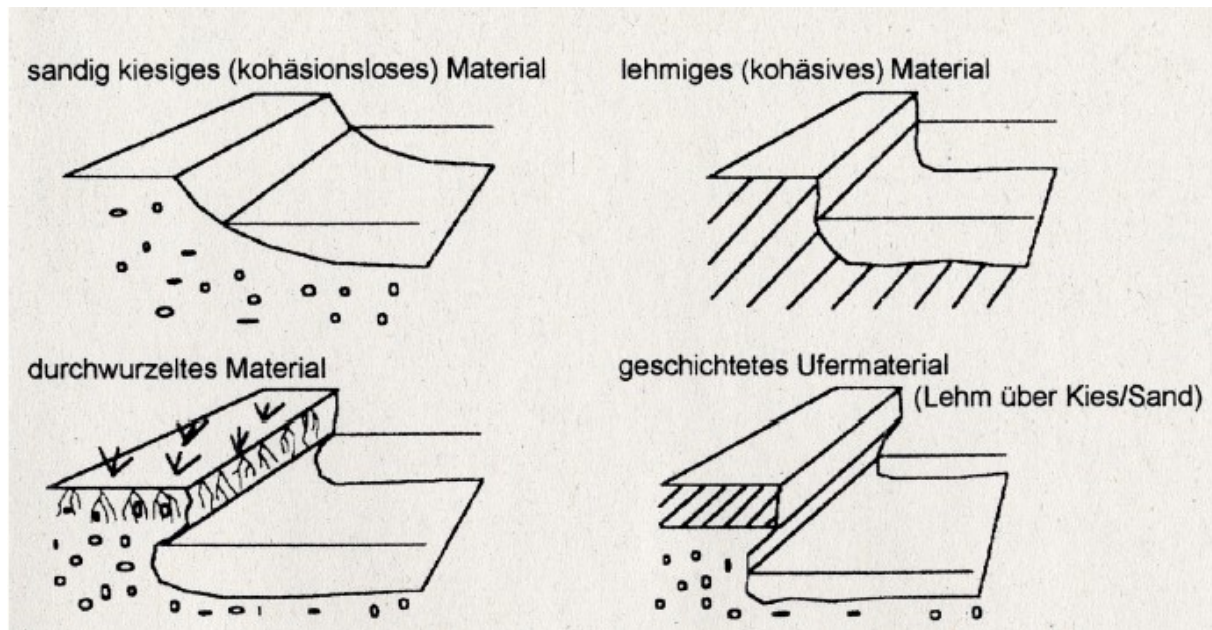


Abb. 2-11: Ausformung der Böschung in Abhängigkeit vom Ufermaterial nach SCHERLE (1999 in REQUENA 2008, S. 44).

2.3.5 Seitenerosion in sand-und kiesführenden Flüssen

Untersuchungen in geraden Gerinnen mithilfe von physikalischen Modellversuchen und numerischen Simulationen wurden von SCHMAUTZ (2003), AUFLEGER et al. (2005) und HAFNER (2008) im Detail durchgeführt. Bei den Arbeiten zu mäandrierenden Flüssen lassen sich nach REQUENA (2008) zwei wichtige Fragestellungen ableiten. Die eine beschäftigt sich mit der grundsätzlichen Entstehung von Mäandern (KELLER 1972, YALIN & DA SILVA 2001, PYRCE & ASHMORE 2003), die andere mit der Mäandermigration, ausgelöst durch Seitenerosion (PARKER 1983, YEN & LEE 1995, beide in REQUENA 2008, BLANCKAERT & GRAF 2001, DA SILVA 2006, YALIN & DA SILVA 2001). Auch eine Methode zur Abschätzung der Erosionsgeschwindigkeit eines Ufers in einem Mäanderbogen (OSMAN & THORNE 1988) oder Berechnungsansätze von DUAN (2005 in REQUENA 2008), SAYNOR und ERSKINE (2006), STEFANOVIC und BRYAN (2007) haben die Ufererosion zum Gegenstand. Meist wird aber ein einzelner Mäanderbogen betrachtet, und zudem gelten die Verfahren nur für kohäsive Ufer aus lehmigem, mergeligem Sand (vgl. REQUENA 2008).

2.3.6 Sohlstrukturen

Bei der Bezeichnung des Gewässersohlenreliefs lassen sich in der Literatur verschiedene Begriffe finden, die einerseits mit der nationalen Herkunft zusammenhängen, aber auch aus unterschiedlichen Disziplinen stammen. Um Missverständnisse zu vermeiden, soll an dieser Stelle ein kurzer Überblick gegeben werden.

Die grundsätzlichen Makro- und Mesostrukturen sind Furten (Riffles), Kolke (Pools) und Bänke (Bars). Inseln können dann als Sohlstruktur bezeichnet werden, wenn sie aus einer Bank hervorgegangen sind und das Auenniveau noch nicht erreicht haben (SCHERLE 1999).

In der vorliegenden Arbeit spielen die Riffle-Pool-Abfolgen (R-P-A) und Bank-Strukturen eine besondere Rolle und sollen deshalb etwas näher beschrieben werden.

Der Originalbegriff „riffle-pool-sequence“ geht auf LEOPOLD und WOLMAN (1957, 1964) LEOPOLD et al. (1964) zurück. Die Autoren bezeichnen damit „Sohlundulationen“ (vgl. VETTER 2008) von mehreren Dezimetern bis wenigen Metern Höhe, je nach Dimension des FG. Dabei sind Sohl-Hochs (Riffles) und Sohl-Tiefs (Pools) zu trennen.

Der Begriff Riffel (im Gegensatz zu „Riffle“) scheint problematisch, weil mit ihm meist Sandrippel gemeint sind (VETTER 2008), die bevorzugt bei sandigem Sohlmaterial bei beruhigter Wasserbewegung auftreten (ENGELUND & FREDSOE 1982). Besonders aufgrund der ähnlichen Schreibweise ist eine Verwechslung nicht auszuschließen, der Unterschied der Phänomene ist allerdings groß und sollte nicht verwechselt werden. Im Gegensatz zu den Sandrippeln sind die Riffles keine Transportkörper, sondern mehr oder weniger lagestabil und in einem Abstand vom Fünf- bis Siebenfachen der Gerinnebreite zu finden (KNIGHTON 1998). Der Begriff „Transportkörper“ entstammt der wasserbaulichen Literatur (ZANKE 1976, FÜHRBÖTER 1980 in VETTER 2008) und bezieht sich allgemein auf bewegliche Sohlformen.

Von FÜHRBÖTER (1980 in VETTER 2008) werden die Kleinformen, wie Rippel, von Großformen, wie Strombänken oder Großriffeln, getrennt (vgl. KNIGHTON 1998). Während die Kleinformen nur die Stromlinien an der Gerinnesohle stören, beeinflussen die Großformen aufgrund ihrer Höhe das Stömungsfeld des gesamten Querschnitts.

Bänke ragen über die mittlere Sohlenlage hinaus und spiegeln je nach Ausformung den Feststofftransport wider. Es können nach KELLERHALS (1967 in SCHERLE 1999) ortsfeste und sich stromabwärts bewegende Bänke unterschieden werden. Eine Unterteilung der „richtigen“ Großformen (zwischen 10 m und 1000 m) wird auch von KNIGHTON (1998) vorgenommen. Es ergeben sich demnach:

1. ortsfeste, an bestimmte Strukturen des Flusslaufes gebundene Bankformen:
 - Krümmungsbänke (auch als Innenbänke bezeichnet) (point bars)
 - Bänke an Zusammenflüssen (auch Mündungsbänke) (tributary bars, channel junction bars)
 - Querbänke (diagonal bars)
 - Diamantbänke (diamod or spool bars)

2. sich bewegende Bankformen:
 - Alternierende Bänke (alternate bars, channel side bars)
 - Mittenbänke (mid-channel bars)

Für Riffles lassen sich weitere Synonyme finden, wie Untiefen, Furten oder Schnellen für Pools sind dies Becken oder Kolke (SCHÄLCHLI 1991). Da die englische Terminologie relativ klar ist, wird auch in der neueren deutschsprachigen Literatur der eingedeutschte Begriff der Riffel-Pool-Sequenz oder Riffel-Pool-Abfolge verwendet.

Eine weiterführende Charakterisierung der Kolke erfolgt von BISSON et al. (1982 in BRUNKE et al. 2012) oder CHURCH (1992).

Eine weitere Gewässersohlenstruktur stellen sog. Glides dar, die bei stärkerem Gefälle auch als Runs bezeichnet werden (BISSON et al. 1982 in BRUNKE et al. 2012). Diese längeren, tieferen Strecken, ohne besondere morphologische Strukturen, entstehen natürlicherweise aus temporär verfüllten Kolken. In hydromorphologisch beeinträchtigten Systemen aber, zeigen Glides die Degradation an (BRUNKE et al. 2012). Diese monotonen Gewässerabschnitte werden an der ebenen Sohle von Sandrippeln begleitet und zeigen eine geringe Veränderung im Quer- und Längsprofil. Damit ist auch die Tiefenvariabilität minimal, da die Kolke mit Feinmaterial zugesetzt sind.

In alluvialen Gerinnen sind Phänomene wie Laufmuster, Sohlformen und Sohlzusammensetzung und Materialverfügbarkeit untrennbar miteinander verbunden. Sedimentologisch konnte KELLER (1971) bzw. KELLER & FLORSHEIM (1993) eine Differenzierung des Materials innerhalb dieser Sequenzen feststellen: gröberes Material in den Riffels und feineres in den Pools. Daraus leitete KELLER (1971) die sog. Geschwindigkeitsumkehrhypothese („velocity-reversal-hypothesis“) ab, die jedoch von einigen Autoren als nicht gültig bezeichnet wird (vgl. VETTER 2008).

Im „Idealzustand“ konnten LEOPOLD et al. (1964) eine Regelmäßigkeit der Riffle-Pool-Abfolgen feststellten, die sich durch zwei R-P-A pro Mäanderwellenlänge auszeichnet. Dabei kommen die Riffles an den Wendepunkten und die Pools in den Krümmungen vor. In der Realität wird diese Regelmäßigkeit jedoch nicht bestätigt. Auch an gestreckten Laufabschnitten setzt sich die Abfolge fort.

Während in feinmaterialführenden Flüssen verschiedene Sohlformen in unterschiedlichen Größenskalen auch in Kombination vorkommen, sind die Riffles und Pools bei Kiesbettgerinnen die bestimmenden Großformen. Die Topographie und die Veränderung dieser Formen sind damit auch gleichzeitig Zeiger für die Dynamik und Materialbeschaffenheit des jeweiligen FG.

Der Prozess der Entstehung der R-P-A ist nicht geklärt (VETTER 2008). Interessant ist der Vergleich von YANG (1971 in VETTER 2008), der dazu das Mäandrieren in der Horizontalen mit der Ausbildung einer wellenförmig verlaufenden Sohle in vertikaler Richtung heranzieht. Die Theorie des „vertikalen Mäandrierens“ (vgl. KELLER & MELHORN 1978) ist aber auch, wie die Theorie der kinematischen Sohlwellen (LEOPOLD et al. 1964, CLIFFORD 1993), nicht bewiesen.

Die Erhaltung der R-P-A mit der „velocity-reversal-hypothesis“ (KELLER 1971) ist die bisher einzige umfassende Theorie, nach der die Pools dadurch erhalten werden, dass sich dort während Hochwasserereignissen höhere sohlnahe Geschwindigkeiten einstellen als über den Riffles mit jeweils entsprechendem Materialtransport. Bewiesen scheint allerdings, dass die R-P-A nicht bei Niedrigwasser erhalten werden (VETTER 2008). Weitere Erklärungsansätze wie die Geschwindigkeitsumkehr bei bordvollen Abflüssen (ANDREWS 1979), Schubspannungsumkehr (LISLE 1979) oder selektiver Sedimenttransport (LISLE 1995, EMMETT & WOLMAN 2001, SEAR 1996) sind zu nennen.

2.4 Terrestrisches Laserscanning bei fluvial-morphologischen Fragestellungen

Die Quantifizierung von Oberflächenveränderungen und die hochgenaue Detektion von Bereichen mit einer erhöhten Dynamik ist oft ein wesentlicher Schritt zur Beantwortung zahlreicher Fragestellungen in der fluvialen Geomorphologie, die wiederum einen zentralen Stellenwert z.B. in der Naturgefahrenforschung, bei der Modellierung von Hochwasserereignissen oder beim Monitoring fluvialer Ökosysteme hat (vgl. HÄMMERLE et al. 2013).

Terrestrisches Laserscanning (TLS) wird inzwischen seit einigen Jahren in den Umweltwissenschaften und für verschiedene Fragestellungen an Fließgewässern eingesetzt. Auch bei der hier vorliegenden Untersuchung leistet das TLS einen wesentlichen Beitrag zur Beschreibung und Bestimmung (Quantifizierung) verschiedener morphologischer Prozesse. Deshalb soll an dieser Stelle der aktuelle Forschungsstand zur Methode umrissen werden.

Im Jahr 2009, mit dem Beginn der Arbeiten am Umgehungsgewässer, wurden auch die „ersten zwei Büchern“ zum Thema veröffentlicht, „Topographic laser ranging and scanning“ von SHAN und TOTH (2009) und „Laser Scanning for the Environmental Sciences“ von HERITAGE et al. (2009) weitere sind in den letzten Jahren dazugekommen.

STOTT (2013) trug seit 2006 im Abstand von jeweils zwei Jahren sämtliche wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Zeitschrift *Earth Surface Processes and Landforms* zusammen. Die Anzahl der wissenschaftlichen Arbeiten, die sich ausschließlich mit fluvial-geomorphologischen Fragestellungen beschäftigten, nahm in diesem Zeitraum um 1/6 zu. Dabei erfolgte auch eine thematische Zuordnung zu zehn Klassen. Das Thema „Bank erosion“ steht dabei an letzter Stelle und die Anzahl der Veröffentlichungen hat, wie auch bei dem Themenkomplex „River management, restoration and effects of vegetation on fluvial systems“ (an vierter Stelle), gegenüber anderen, wie z. B. „Advances in methodology in fluvial geomorphology“, auch weiter abgenommen (Abb. 2-12).

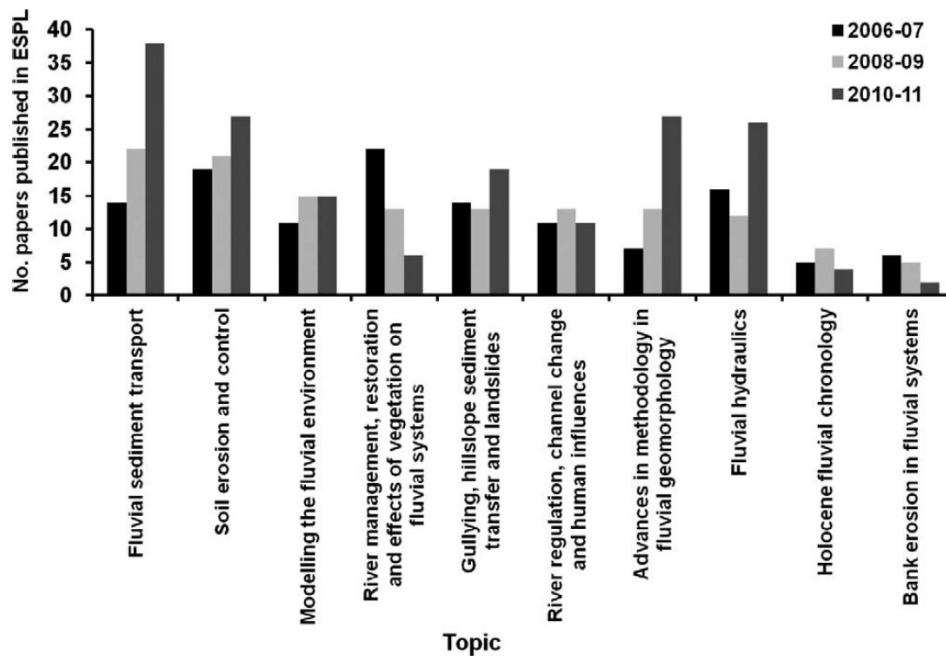


Abb. 2-12: Anzahl fluvial geomorphologischer Veröffentlichungen in der Zeitschrift ESPL (Earth Surface Processes and Landforms) (STOTT 2013, S. 249).

Die Zahl der Publikationen über „Fernerkundung“ (remote sensing) und über „TLS“ und „TLS zur Detektion von Massenbewegungen“ (landslide studies) hat besonders in den letzten Jahren dagegen kontinuierlich zugenommen (vgl. STOTT 2013) und dieser Trend scheint auch noch weiter anzuhalten (DERRON & JABOYEDOFF 2010). Insbesondere bei fluvial-morphologischen Arbeiten wird TLS zunehmend mit anderen Methoden wie einem Echolot oder ADCP ergänzt (vgl. NASERMOADDELI & PASCHE 2008, KASVI et al. 2013, WILLIAMS et al. 2014). Immer leistungsfähigere Geräte erzeugen noch hochaufgelöstere Daten und erfordern damit auch neue Bearbeitungstechniken.

Ein wesentliches Zwischen- bzw. Endprodukt sind Digitale Geländemodelle (DGM) bzw. Digital Elevation Models (DEM) oder auch Digitale Oberflächenmodelle (DOM bzw. Digital Surface Models (DSM)). DGM können je nach Auflösung auf der Mikroskala Verwendung finden, in dem z. B. die „in situ sediments“, auf Basis der Korngrößen-Skala (mit einer Punktdichte im Millimeterbereich) auf Korngrößenverteilung, Ausrichtung und Dachziegellagerung betrachtet werden (HODGE et al. 2009A, B) oder aber auf der nächst höheren Ebene, die von WILLIAMS et al. (2014) als “bar scale“ bezeichnet wird. Hier werden durch mehrere Scanpositionen größere Bereiche (Sand und Kiesbänke, Uferbereiche etc.) erfasst (HERITAGE & HETHERINGTON 2007, HERITAGE & MILAN 2009, RESOP & HESSION 2010, O’NEAL & PIZZUTO 2011, HERITAGE & HETHERINGTON 2007, KASVI et al. 2013, HÄMMERLE et al. 2013) oder die Morphodynamik z. B. über 10 Tage hinweg an einem verflochtenen Gebirgsbach über einen Bereich von etwa 50 m x 100 m erforscht (MILAN et al. 2007). Eine andere Anwendung auf dieser Skala sind Korngrößen-Rauigkeitskarten (grain size roughness maps) (ENTWISTLE & FULLER 2009, MILAN 2009). Auf der Makroskala wird TLS angewendet, um die Morphologie, Oberfläche und die Veränderung eines größeren

Flussabschnittes (z. B. 1 km wie beim Fluss Feshie, Scotland) darzustellen (BRASINGTON et al. 2012, PICCO et al. 2012) oder mehrere Gleithänge entlang eines 6 km langen Abschnittes mit mobilen Systemen am Boot (ALHO et al. 2009) zu erfassen. Eine Möglichkeit, noch größere Bereiche relativ hoch aufgelöst aufzunehmen, ist das Airborne Laser Scanning (ALS) und anschließend die Erstellung eines Geländemodells eines ganzen Flusslaufes (MANDLBURGER ET AL. 2009). DERRON und JABOYEDOFF (2010) sprechen von hochgenauen Geländemodellen ("highresolution digital elevation models" - HRDEM), die für kleine und große Maßstäbe genutzt werden können.

Einigkeit besteht, dass die Erstellung von solchen DGM durchaus anspruchsvoll ist und je nach Fragestellung und weiterem Anwendungsbezug eine starke interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordert (HERITAGE UND HETHERINGTON 2007, MANDLBURGER ET AL. 2009). WILLIAMS et al. (2014) nennen drei unterschiedliche Anwendungen und Einsatzbereiche solcher DGM, die die Dynamik in Flusslandschaften wiedergeben sollen.

Zum einen werden DGM (hier meist aus ALS-Daten generiert) genutzt, um entsprechende Eingangsdaten zu liefern, die dann für hydrodynamische und morphodynamische 2D- und 3D-Modelle (im folgenden Text wird die vom Duden (3-D) abweichende Schreibweise bevorzugt, um bei zusammengesetzten Ausdrücken die Lesbarkeit zu erleichtern) Verwendung finden (COBBY ET AL. 2001, HORRITT & BATES 2002, DAL CIN ET AL. 2005, YU & LANE 2006, CASAS ET AL. 2006, McMILLAN & BRASINGTON 2007, FEWTRELL ET AL. 2008, MANDLBURGER ET AL. 2009) oder um eine geomorphologische Kartierung durchzuführen und andere morphologische Aspekte abbilden zu können. Viele der Untersuchungen fanden in Auen statt, in denen laterale Prozesse eine größere Rolle spielen als Prozesse, die auf der vertikalen Ebene ablaufen (MASON et al. 2003, CHALLIS & HOWARD 2006, NELSON et al. 2006). Ein Ergebnis kann auch die Rekonstruktion von alten Flusswindungen und Uferdämmen sein (NOTEBAERT et al. 2009).

Zum anderen werden sogenannte DoD (DEM of Difference) erstellt, was zur einer Art Standard-Methode bei der Detektion von Oberflächenveränderungen geworden ist. Diese DoD werden benutzt, um Prognosen zu tätigen und Volumenabschätzungen zu treffen. Die Überführung einer Punktwolke in ein Rasterformat kann entweder bei einer planaren Ausrichtung, also horizontaler Betrachtung (Vogelperspektive) des Objekts durch die Übernahme des Koordinatensystems (BRASINGTON et al. 2000, LANE et al. 2003, MILAN et al. 2007, WHEATON et al. 2010A, SCHÜRCH et al. 2011), oder nach Transformation des Koordinatensystems (Drehung der Achsen) (NASERMOADDELI & PASCHE 2008, O'NEAL & PIZZUTO 2011) erfolgen. Mit geeigneten, zusätzlichen Informationen können die Daten sogar genutzt werden, um indirekt Abschätzungen über den Sedimenttransport zu treffen (MARTIN & CHURCH 1995, LANE et al. 1995 in WILLIAMS et al. 2014, BRASINGTON et al. 2003; ASHMORE & CHURCH 1998).

Bis jetzt müssen zwei Nachteile bei der DoD-Methode in Kauf genommen werden: Eine 3D-Abbildung ist durch das Rasterformat nicht möglich und auch bei der Abbildung der Geländerauigkeit müssen Einschränkungen in Kauf genommen werden. In Bereichen mit einer geringen Informationsdichte entstehen Datenlücken (sog. No-Data Zellen), welche über Interpolationsverfahren geschlossen werden können. Da jede Interpolationsmethode ihre Vor- und Nachteile besitzt, muss die Wahl gut überlegt sein (SCHÜRCH et al. 2011, RYCHKOV et al. 2012).

Dennoch ist diese rasterbasierte Technik eine relativ praktikable Methode, bei der Messunsicherheiten infolge der Registrierung, Datenaufnahme und anderer Fehlerquellen berücksichtigt werden können (VGL. BRASINGTON et al. 2000, LANE et al. 2003, WHEATON et al. 2010A, SCHÜRCH et al. 2011).

Letztendlich ist die Nutzung von DGM zur Erfassung verschiedener Strukturen innerhalb des fluvialen Systems und auch über verschiedene Betrachtungsebenen hinaus eine klassische Anwendung. Diese reicht von der Bestimmung der Korngröße, Bettraugigkeit und Lagerung von Sedimenten (BUTLER et al. 2010 in WILLIAMS et al. 2014, HODGE et al. 2009A, BRASINGTON et al. 2012) bis hin zu Kartierung von „in-stream physical habitats“ (LARGE & HERITAGE 2007, LANE & CARBONNEAU 2008, WHEATON et al. 2010B, CZERNY et al. 2010). Gerade das „habitat mapping“ ist bzw. war subjektiv. Mit dem neuen Ansatz über die Aufnahme der unterschiedlichen Struktur der Wasseroberfläche können Rückschlüsse auf Biotope mittels TLS gezogen und entsprechend klassifiziert werden (MILAN 2009).

Inzwischen ist auch die Aufnahme von Unterwasserbereichen über grüne Laser möglich (MCKEAN et al. 2009, KINZEL et al. 2013).

Allerdings sind schon bei der Geländeaufnahme am FG neben den rein technischen Dingen weitere Faktoren zu beachten. Für ein optimales Untersuchungsdesign sollten je nach Geländeoberfläche auch die unterschiedlichen Punktdichten (entfernungsbedingt) und der Eintreffwinkel mit berücksichtigt werden. Ungenauigkeiten durch sich rasch verändernde Topographien („mobility problem“) (vgl. WILLIAMS et al. 2014) wirken sich dann bei der Modellierung entsprechend negativ aus (CASAS et al. 2010, LEGLEITER et al. 2011). Diese sich schnell verändernden Oberflächen stehen in engem Zusammenhang mit dem nach HICKS (2012) benannten ‘wettered channel problem’ (vgl. WILLIAMS et al. 2014), da es immer Bereiche gibt, die überflutet sind. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der schon weiter oben angeführten Methodenkombination.

Einige Arbeiten haben sich mit der Suche nach Fehlerquellen bei TLS-Daten beschäftigt. Die Arbeiten nennen verschiedene Reflexionseigenschaften, unterschiedliche Punktdichten und Reflexionen bei scharfen Kanten, sowie den, sich mit zunehmender Entfernung vergrößernden „laser footprint“ und den Auftreffwinkel als Fehlerquellen (Näheres in Kapitel 5.2.4). Diese zuletzt genannte Fehlerquelle, durch Streckdehnung des Laserstrahls bei stumpfen Einfallswinkeln, ist aber nach SCHÜRCH et al. (2011) ein zu vernachlässigender Effekt im Hinblick auf die final registrierte Punktwolke.

Manche Arbeiten beschäftigen sich speziell mit der Erfassung der Topographie eines Flussbettes und den Effekten, die entstehen, wenn vom Wasser benetzte Bereiche aufgenommen werden (ZIPPELT & CZERNY 2010). Hierzu sind von den eben genannten Autoren weitere Untersuchungen unter kontrollierten Laborbedingungen geplant. Oft wird das Thema der Bearbeitung der Punktwolken angegangen, wobei u.a. verschiedene Techniken vorgestellt werden, wie bei der Klassifizierung der registrierten Punktwolken in Boden- und Vegetationspunkte vorgegangen werden kann.

Für die Detektion von Oberflächenveränderungen werden neben den beiden anderen Varianten (Dreiecksnetzvermaschung und Erstellung von gemischten Netzen) Punktwolken oft gegriddet (MILAN et al. 2007, HODGE et al. 2009A, O'NEAL & PIZZUTO 2011). In der vorliegenden Arbeit wird der Aufbau von DGM ebenfalls durch Gitternetze durchgeführt.

Bei Flusslandschaften, die sich zwischen zwei Aufnahmen durch Erosion, Sedimentation oder Vegetation verändern, sehen LAGUE et al. (2013) den direkten Vergleich der Punktwolken als möglichen Weg und präsentieren einen „Multiscale Model to Model Cloud Comparison“ (M3C2) Algorithmus in zwei Bearbeitungsschritten, der ohne Gridding auskommt und der Ähnlichkeiten zur DoD-Methode aufweist.

Neben den bereits diskutierten Möglichkeiten, die Punktwolken zu bearbeiten, oder direkt mit Punktwolken zu arbeiten und hier Distanzunterschiede der Punktwolken zu vergleichen (LAGUE et al. 2013), wird von STAREK et al. (2013) vorgeschlagen, die DGMs als Zeitreihen zu behandeln, indem die Daten direkt von der Punktwolke in ein „Voxel model“ (= 3-dimensionales Grid) gestapelt werden, um daraus einen STC (Space-Time-Cube) zu formen. Solche STC sollen eine kompakte Darstellung der Ufer ermöglichen und zeigen, dass Erosion hoch veränderlich in Raum und Zeit ist. STAREK et al. (2013) konnten mit ihren 9 Aufnahmen über eine Zeitspanne von 18 Monaten an einem Hang von 11,5 m Breite und 3,2 m Höhe auch zeigen, dass eine große Veränderung oft episodisch, in Abhängigkeit vom Hangversagen stattfindet.

Der klassische Ansatz zur DGM-Validierung ist der Vergleich mit einer begrenzten Zahl von Kontrollpunkten, die entweder mit einer Totalstation oder einem differentiellen GPS eingemessen werden (STOJIC et al. 1998, BRASINGTON et al. 2003, LANE et al. 2003). Viele Studien (BRASINGTON et al. 2003, FULLER et al. 2003, LANE et al. 2003) benutzen den Ansatz zur Berücksichtigung des Messfehlers (siehe Kapitel 5.2.4.3), der von BEVINGTON (1969) und TAYLOR (1982) gemacht wurde, um Unsicherheiten bei der Berechnung von DGM zu berücksichtigen.

MILAN et al. (2007) sehen bei Aufnahmen von Flüssen mit TLS gegenüber ALS einige Vorteile (vgl. BIRD et al. 2010). LICHUN (2002) beurteilt das (Airborne) Laserscanningverfahren im Wald um ein Vielfaches besser geeignet als ein photogrammetrisches Verfahren.

NASERMOADDELI und PASCHE (2010) stellen fest, dass zwar seit einigen Jahrzehnten Forschung im Bereich der Ufererosion betrieben wird, aber nur geringe Fortschritte erreicht werden konnten, wenn es um die Modellierung von Ufererosion in nicht bindigem Material geht. Dies hängt vor allem mit den noch nicht vollständig geklärten, wesentlichen Prozessen, aber auch mit zu einfachen theoretischen Konzepten, um diese Prozesse zu beschreiben, zusammen.

WILLIAMS et al. (2014) weist auf die drei physikalischen Faktoren hin, die die Arbeit am FG erschweren: die komplexe Topographie, Überflutung des Flussbettes und die hohen Veränderungsraten.

Über die vorgestellten Forschungsbereiche hinaus gibt es noch eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für die mittels TLS aufgenommenen Daten (NOTEBAERT et al. 2009).

3. FORSCHUNGSBEDARF

3.1 Fragestellung

Bereits im Einleitungskapitel 1.3 und bei den Erläuterungen zum Forschungsstand (Kapitel 2.3) wurden zahlreiche Problemfelder, und ungelöste Fragen angesprochen, die sich im Zusammenhang mit der Fließgewässerforschung ergeben. Soweit möglich wurden im letzten Kapitel einzelne Sachverhalte und auch methodische Vorgehensweisen konkretisiert, woraus eine Vielzahl von unterschiedlichen Forschungslücken abzuleiten ist. Die morphologischen Auswirkungen eigendynamischer Flussentwicklung unter gesteuerten hydrologischen Verhältnissen wurden bisher nicht systematisch untersucht. Auch Erfahrungen zu neu angelegten Umgehungsgewässern sind nicht bekannt. Die künstliche Nachahmung von Hochwasserereignissen durch Ökologische Flutungen ist ebenfalls eine wenig erforschte Maßnahme im Zuge von Renaturierungsmaßnahmen. Es ist davon auszugehen, dass sich im Vergleich zu Modellversuchen (Strömungsversuche in Gerinnestrecken) und der Forschung an natürlichen FG Unterschiede ergeben, die durch diese Arbeit herausgearbeitet werden.

Neben der übergeordneten zentralen Frage des „ökologischen Mehrwertes“ (vgl. HERRMANN 2001) für das Projekt der Dynamisierung (Kapitel 1.2 u. 4.2), leiten sich aus der abiotischen-prozessualen Sichtweise eine ganze Reihe von Fragen ab, von denen einige durch diese Arbeit beantwortet werden sollen.

Die zentrale Fragestellung lautet: Wie entwickelt sich die Morphologie des naturnah angelegten Umgehungsgewässers?

Entscheidend sind somit die Begriffe Entwicklung, Morphologie und Gewässer. Damit werden zum einen der Prozessgedanke und die Dynamik angesprochen. Über die „Morphologie“ wird die Form beschrieben, vereinfacht der „Zustand“ des Objektes, und über das „Gewässer“ ist die Kraft, die zur Veränderung führt, auch mit Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die vereinfachte zentrale Hypothese lautet demnach: Neue naturnah angelegte Fließgewässer haben eine eigene Dynamik, die sie von natürlichen Fließgewässern unterscheidet.

Aufgrund der Maßnahmenkombination innerhalb des Dynamisierungsprojektes kann zwischen Fragen, die projektspezifisch sind – und mehr oder weniger direkt mit den Dynamisierungsmaßnahmen zusammenhängen – und eher allgemein gültigen Fragen unterschieden werden, wenngleich eine strikte Trennung weder zielführend noch möglich ist.

Einige von ihnen wurden bereits (zumindest indirekt) formuliert. Manche der aufgeführten Fragen haben sich erst während der Umsetzung der Dynamisierung ergeben, andere sollten von Anfang an durch die Untersuchungen beantwortet werden.

Die projektspezifischen Fragen sind nach FISCHER und CYFFKA (in press):

- Führen die Ausleitungen (Umgebungsgewässer, Ökologische Flutung) zum prognostizierten Zustand (Ausleitungsmenge versus verbleibende Wassermenge im Gebiet)?
- Breiten sich die Überflutungsflächen bei Ökologischen Flutungen wie geplant aus?
- Inwieweit führen die beschriebenen Dynamisierungsmaßnahmen
 - a) Umgebungsgewässer,
 - b) Ökologische Flutungen
 - c) Grundwasserabsenkung (wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt)im Einzelnen oder in Kombination zu den naturschutzfachlich erwünschten und bezüglich der Auedynamik erwarteten Veränderungen an den verschiedenen Auenstandorten?
- Können technische Maßnahmen wie Umgebungsgewässer und Ökologische Flutung die für natürliche Auen auentypischen Prozesse im Hinblick auf Wasser, Sedimenttransport und regelmäßige Störungen ausreichend simulieren?

Die allgemeinen hydrologischen und fluvial-morphologischen Fragen sind u. a. :

- Bestehen Wechselwirkungen zwischen dem Abfluss und der Gerinneform (Gerinnegeometrie, Querprofil, Querschnitt) in künstlich angelegten Gerinnen?
- Ist ein Zusammenhang zwischen Form und Materialtransport sowie zum vorherrschenden Material im Gewässerbett zu erkennen?
- Wie lange haben Formen (naturnahe oder natürliche) Bestand, wann werden sie wieder zerstört? Wie und wo Entstehen naturnahe Strukturen?
- Kann die fehlende Überflutungsdynamik wieder hergestellt werden?
- Ist das terrestrische Laserscanning eine geeignete Methode zur Erfassung der morphologischen Veränderungen an neu angelegten Gewässerstrecken?

3.2 Zielsetzung

Jeder, der sich mit Umweltaspekten befasst, sie beobachtet, bewertet und zu verstehen versucht, tut dies auf Basis seiner eigenen Vorstellungen (HARRES 1992). Dabei spielt auch die Einstellung zur Position und Rolle des Menschen innerhalb der Natur eine wichtige Rolle. Da diese Grundeinstellungen sehr unterschiedlich sein können, erwächst ein relativ breites Spektrum bei der Beurteilung von Veränderungen solcher Systeme (HARRES 1992).

„Die Wissenschaft begnügt sich nicht mit dem Bilde des Flusses, wie ihn der Beobachter in einem Augenblick gesehen hat. Sie verfolgt seine zwischen Hoch- und Niedrigwasser wechselnden Zustände und faßt sie alle in einer abstrakten Vorstellung dieses Flusses zusammen“ (SCHLÜTER 1919, S. 17 in SCHMITHÜSEN 1976, S. 203).

Je nach Standpunkt des Forschers und der aktuellen Fragestellung wird also einmal mehr die Dynamik am Ufer eines Flussabschnittes (kleinräumig, im großen Maßstab) oder die Dynamik in der Aue (kleiner Maßstab) betrachtet. Einmal werden eher die hydrologischen Prozesse, dann wieder die morphologischen Veränderungen von bestimmten Formen untersucht.

Beschäftigt man sich mit Flusslandschaften, tauchen, wie bereits mehrfach angedeutet, eine Reihe von Problemkomplexen auf, die seit längerem bekannt, teilweise bearbeitet und kaum geklärt sind (vgl. VETTER 2008). Als Grund sind die Vielfalt und Komplexität der Prozesse selbst, die jeweiligen Interaktionen, sowie die systemeigenen Schwierigkeiten, die bei der Untersuchung entstehen, zu nennen. Nicht zuletzt wegen personeller und finanzieller Mittel musste daher eine Beschränkung (z. B. Außerachtlassung der Grundwasserdynamik und den Effekten der Grundwasserabsenkung) auf einige Parameter (z. B. keine ausführliche Analyse der Korngrößenverteilung an Ufer und Gewässersohle, Bestimmung der Ufervegetation und ihr Einfluss auf die Morphologie) und Aufnahmezeitpunkte (z. B. Messung in größeren Abständen) an ausgewählten Standorten erfolgen.

Grundsätzlich kann zwischen vier raumzeitlich wirksamen Prozessen unterschieden werden, die für diese Arbeit besonders relevant sind und näher untersucht wurden. Diese wurden von PROMINSKI et al. (2012, S. 19) in Abbildung 3-1 graphisch umgesetzt.

- 1 Hydrologische Prozesse
 - Teilprozess 1: Vertikale Wasserstandsschwankungen
 - Teilprozess 2: Horizontale Ausbreitung des Wassers
- 2 Morphodynamische Prozesse
 - Teilprozess 1: Umlagerungsprozesse im Gewässerbett
 - Teilprozess 2: Eigendynamische Laufverlagerung

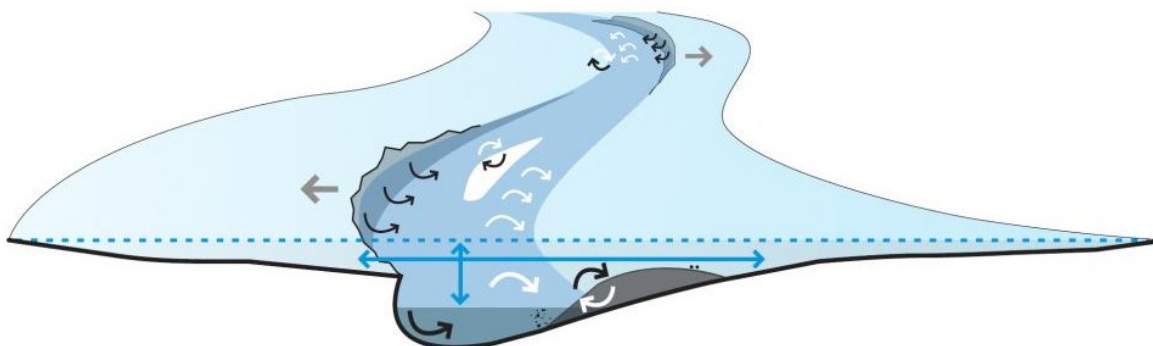


Abb. 3-1: Die vier wesentlichen räumlich-zeitlich wirkenden Prozesse in Fließgewässern. Vertikale und horizontale Wasserstandsschwankungen (blaue Pfeile), Umlagerungsprozesse (Kreispfeile), Erosion (schwarze Pfeile) und Sedimentation (weiße Pfeile) führen zur Laufverlagerung (graue Pfeile) (PROMINSKI et al. 2012, S. 19).

Vom Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) wurde in einem Merkblattentwurf ein Zielsystem für Renaturierungen erstellt (Tab. 3-1), welches Teilziele strukturiert und welches für die umweltverträgliche Planung von Maßnahmen an FG herangezogen werden kann (DVWK MERKBLATTENTWURF 1996 in SCHERLE 1999). Hier werden beim Schutzgut „Wasser“ (oberste Hierarchieebene) die sogenannten Struktur- und Funktionskomplexe Gewässermorphologie und Hydrologie aufgeführt. Die repräsentativen Ökofaktoren wurden ausgewählt, einen Teil des Ökosystems entsprechend abzubilden. Ein Großteil von ihnen wird auch in der Arbeit näher behandelt, manche Faktoren werden durch Maßzahlen präzisiert und können dann den Zustand des FG beschreiben (vgl Tab. 3-1).

Tab. 3-1: Hydrologischer und gewässermorphologischer Funktionskomplex eines gewässer-ökologischen Zielsystems (leicht verändert). In fetten Lettern sind die in der Arbeit behandelten Faktoren hervorgehoben (DVWK MERKBLATTENTWURF 1996 in SCHERLE 1999, S.1-13).

Struktur- und Funktionskomplexe	Teilkomplexe	Repräsentative Ökofaktoren
HYDROLOGIE (Erhalten oder Wiederherstellen eines/einer den klimatischen Verhältnissen und dem natürlichen Abflussverhalten im Einzugsgebiet entsprechenden Abfluss- und Grundwasserregimes und Abflussdynamik)	Abfluss	jahreszeitliche Abflussverteilung
		tägliche Abflussverteilung
		Abflussmenge
		Wasserstands-Abfluss-Beziehung
		mittl. Fließgeschwindigkeit
		mittl. Sohlschubspannung
		Schwebstoffführung
	Überflutung	Überflutungshäufigkeit
		Überflutungshöhe
		Überflutungsdauer
		Überflutungsfläche
	Grundwasser	mittl. Flurabstand
		Grundwasserschwankungsbereich
Zeitl. Verlauf der Grundwasserstände		
Korrelation Fluss- mit Grundwasserstand		
GEWÄSSERMORPHOLOGIE (Erhalten oder Wiederherstellen bzw. Entwickeln einer natürlichen oder naturnahen Lauform, Bettgröße, Sohl- und Uferstruktur)	Linienführung, längszonale Veränderung Bettgeometrie	Windungsgrad
		Laufamplitude
		Sohlgefälle
		Tiefen- u, Breitenvariabilität
		mittl. Gewässertiefe u. -breite
	Sohle	horizontaler Sohlenaufbau/Choriotopverteilung
		vertikaler Sohlenaufbau/Korngrößenverteilung
		Bänke
		Furten/Kolke
	Ufer	Uferform
		vertikaler Uferaufbau/Korngrößenverteilung
		Ufervegetation
	Aue	Ausdehnung
		Strukturelemente
		Vernetzung

Die vorliegende Arbeit hat mit den angewendeten Methoden zum Ziel, Erkenntnisse über die Entwicklung in naturnah angelegten Fließgewässern zu gewinnen. Die morphologischen Prozesse, die nach „Inbetriebnahme“ eines Gewässers ablaufen, und welche Faktoren die weitere Entwicklung maßgeblich beeinflussen, sollen geklärt werden. Auch die Beschreibung und Interpretation weiterer abiotischen Faktoren und Prozesse, die sich im Zusammenhang mit den Ökologischen Flutungen ergeben, sind Bestandteil der Arbeit (hydrologischer Teilkomplex Überflutung). Bezogen auf die ÖF soll der Fokus jedoch im Wesentlichen auf der Entwicklung der Überflutungsflächen liegen (Teilprozess 2). Es wird auch der Frage nachgegangen werden, ob, und wenn ja, wo sich eine Sekundäraue im Untersuchungsgebiet (UG) entwickelt.

Dabei müssen immer die projektspezifischen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden, was der gesamten Arbeit unweigerlich einen großen Praxisbezug verleiht. Wie bei den aufgeworfenen Fragen können auch die Ziele in projektspezifische und allgemeine Ziele unterteilt werden.

Projektspezifische Ziele der Untersuchung

- Anpassung (ökologische Optimierung) der Dotation (m^3/s) von Umgehungsgewässer (perennierend) und Ökologischer Flutung (periodisch) – in Abstimmung mit dem WWA Ingolstadt und den Anforderungen an eine Dynamisierung. Dabei sind die Ziele:
 - die Durchgängigkeit für wassergebundene Organismen zu sichern
 - neue aquatische und semi-terrestrische Lebensräume innerhalb der Aue entstehen zu lassen
 - die Dotation, Häufigkeit und jahreszeitliche Verteilung der Ökologischen Flutungen so zu gestalten, dass dynamische Prozesse ablaufen
- die zwei (Umgehungsgewässer, Ökologische Flutungen) bzw. drei Maßnahmen (inkl. Grundwasserabsenkung – nicht Gegenstand der Arbeit) so in Einklang zu bringen, dass die unter ihrem Einfluss stehenden Standorte und die autotypischen Lebensgemeinschaften größtmöglich davon profitieren
- Aussagen über die ausgeleitete Wassermenge (OHB und ÖF) im Gebiet treffen zu können (Fließzeiten, Strömungsverhältnisse, Ausbreitungsgeschwindigkeit, ablaufender Ast bei Hochwasser)
- Angaben zu den Überflutungsflächen, die bei einer ÖF entstehen (Ausbreitung, Überstauhöhen, etc.) machen zu können
- Rückstauprozesse zu beurteilen und Aussagen zur Wiederherstellung der Konnektivität zwischen Fluss und Aue zu treffen

Allgemeine Ziele der Untersuchung

Das Arbeitsfeld im Bereich der fluvialen Morphodynamik ist in dieser Dimension ein Glücksfall. Es ergibt sich in einem großen Freilandversuch die einzigartige Möglichkeit, die morphodynamische Entwicklung eines neuen Fließgewässers in Kombination mit Ökologischen Flutungen und Grundwasserabsenkungen wissenschaftlich zu begleiten,

wobei der Beobachtungsstart vor der ersten Wassereinleitung erfolgte!

Im ersten Abschnitt von etwa 2 km Länge wurde initial ein Gerinnebett geschaffen. Jetzt soll im Flussbett eine eigendynamische Entwicklung stattfinden. Zwischen 0,5 m³/s und 5,0 m³/s Ausleitungs-menge werden entsprechende Erosions-, Transport- und Sedimentationsprozesse stattfinden – eben solche, wie sie in einem dynamischen FG üblich sind. Dies gilt es zu beobachten, zu kartieren und zu quantifizieren, um damit eine Einschätzung des Erfolges der Dynamisierung treffen zu können.

Allgemeine Ziele sind:

- Systematische Erfassung (Messung) und Analyse der Gerinnemorphometrie mittels terrestrischem Laserscanning
- Morphometrischer und morphodynamischer Vergleich von ausgewählten Standorten mit terrestrischem Laserscanning
- Quantifizierung und Prozessbeschreibung mit möglichst weitreichender Verknüpfung hinsichtlich der Durchflussmengen
- Erfassung von kleinräumigen Laufmusteränderungen mithilfe von terrestrischem Laserscanning (TLS)
- Systematische Vermessung des Gerinnequerschnittes durch Querprofilaufnahmen
- Dokumentation der Riffle-Pool-Sohldynamik
- Erfassung von Strukturelementen und deren Dynamik

3.3 Methodik und Untersuchungsprogramm

Gerade in hochdynamischen Ökosystemen, zu denen Auen zweifelsfrei gehören (JUNK et al. 1989, DISTER 1991, RICHARDS et al. 2002, JÜRGING & PATT 2005), erfordert auch das Monitoring eine gewisse Flexibilität. Dies kann nach Ansicht des Autors nur durch einen „dynamischen Methodenmix“ (FISCHER et al. 2012B) für „*such a multi-faceted discipline*“ (DARBY & SEAR 2008, S. VII) erreicht werden. Zum einen ist damit gemeint, eine Vielzahl von Geräten und Methoden einzusetzen, die je nach Untersuchungsgegenstand und/oder Betrachtungsebenen variieren, zum anderen aber auch, diese bei Bedarf untereinander immer wieder neu zu kombinieren oder zu wechseln (auch während einer Aufnahme oder Messkampagne). Die kurze Vorlaufzeit einer ÖF erfordert unter anderem eine entsprechende Spontaneität und Flexibilität hinsichtlich des Geländeeinsatzes. Auch ein im Voraus gründlich überlegter Einsatzplan lässt sich selten so verwirklichen, weil zu viele unbekannte Größen die Durchführung verhindern. Abbildung 3-2 liefert einen schematischen Überblick über die verschiedenen Skalen und Betrachtungsebenen des FG-Auen-Systems (vgl. FRISSELL et al. 1986, KERN 1994) und die zur Verfügung stehenden Werkzeuge und Methoden für wissenschaftliche Untersuchungen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit und dem Teilprojekt II (siehe oben) angewendet worden sind.

	Grundriss	Querschnitt	Methoden	
Einzugsgebiet			<ul style="list-style-type: none"> - Luftbilddaufnahme (Helikopter) - Airborne Laserscanning - Wasserstandsmessung (Pegel) - GIS-Auswertungen <p>Grundlagendaten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Luft- und Satellitenbilder - Einzugsgebietsinformationen - Geologische Karten 	
Flusslauf/Flussabschnitt			<ul style="list-style-type: none"> - Airborne Laserscanning - Terrestrisches Laserscanning - Luftbilddaufnahme (Drohne) - Kartierung mit GPS/dGPS - Wasserstandsmessung (Pegel) - GIS-Auswertungen → Geländemodelle 	
Flussabschnitt			<ul style="list-style-type: none"> - Terrestrisches Laserscanning - Luftbilddaufnahme (Drohne) - Kartierung mit GPS/dGPS - Wasserstandsmessung (Pegel) - GIS-Auswertungen → Geländemodelle 	
Meso-/ Makrohabitat			<ul style="list-style-type: none"> - Terrestrisches Laserscanning - Photogrammetrie - dGPS-Kartierung - Vermessung mit Tachymetrie - Querprofilvermessung - Zeitrafferkamera-Aufnahmen - Durchflussmessung - Wasserstandsmessung (Pegel) 	
Mikrohabitat	<p>1</p> <ul style="list-style-type: none"> - Falllaub - abgestorbene Pflanzen <p>2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Totholz 	<p>3</p> <ul style="list-style-type: none"> - Strömung mit erhöhter Fließgeschwindigkeit 	<p>1</p> <ul style="list-style-type: none"> - kiesiges Sediment <p>2</p> <ul style="list-style-type: none"> - sandiges Sediment Feinmaterial (Schluff/Lehm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Geschiebemessung - Schwebstoffmessung - Wasserproben - Fließgeschwindigkeitsmessung - Scherfestigkeitsmessung mit Flügelsonde - Korngrößenanalyse - Bodenuntersuchung

Abb. 3-2: Maßstabsebenen im Fließgewässer und in Auen (schematisch, stark verändert nach POOLE 2002), erweitert mit den im Teilprojekt II des Monitoring Projektes eingesetzten Methoden und Werkzeugen(FISCHER & CYFFKA in press).

Dabei korrelieren die räumlichen Ebenen (Mesohabitat, Flussabschnitt) mit der zeitlichen Entwicklung, und diese beeinflusst wiederum den Einsatz der Messmethoden. Je größer die Betrachtungsebene, desto geringer ist die Dynamik und umso länger dauern im Allgemeinen Veränderungsprozesse (FRISSELL et al. 1986, JUNGWIRTH et al. 2003). Je kleiner die Betrachtungsebene oder je höher die Dynamik, umso häufiger sind Messungen nötig, um die Veränderung zufriedenstellend zu dokumentieren und Prozesse hinreichend genau zu erfassen. Makrohabitate, wie Prallhänge, verändern sich zuweilen mehrmals pro Jahr – oder auch an einem Tag – besonders wenn sie während einer ÖF starken Um- und Überformungsprozessen ausgesetzt sind. Mesohabitate, z. B. kleinere Bereiche innerhalb eines Prallhangs oder einer Kiesbank sind dann noch häufiger einem Wechsel unterzogen.

Für ein sich so schnell veränderndes System scheint der Einsatz von terrestrischem Laserscanning als hochauflösende, schnelle Methode zur Detektion von Oberflächenveränderungen prädestiniert. Für die hydrologischen Untersuchungen wurden automatisch aufzeichnende Pegel eingesetzt.

Aus der Abbildung 3-3 wird die Methodik für den hydrologischen Teil und in der Abbildung 3-4 für den morphologischen Teil dargestellt. Dabei wird neben der Methode auch das „Werkzeug“ zur Erfassung der jeweiligen Parameter (Variablen) genannt. Die Skala bezieht sich auf den Maßstabsbereich und die Dimension (horizontal, vertikal oder longitudinal) wird über die Pfeilrichtungen repräsentiert.

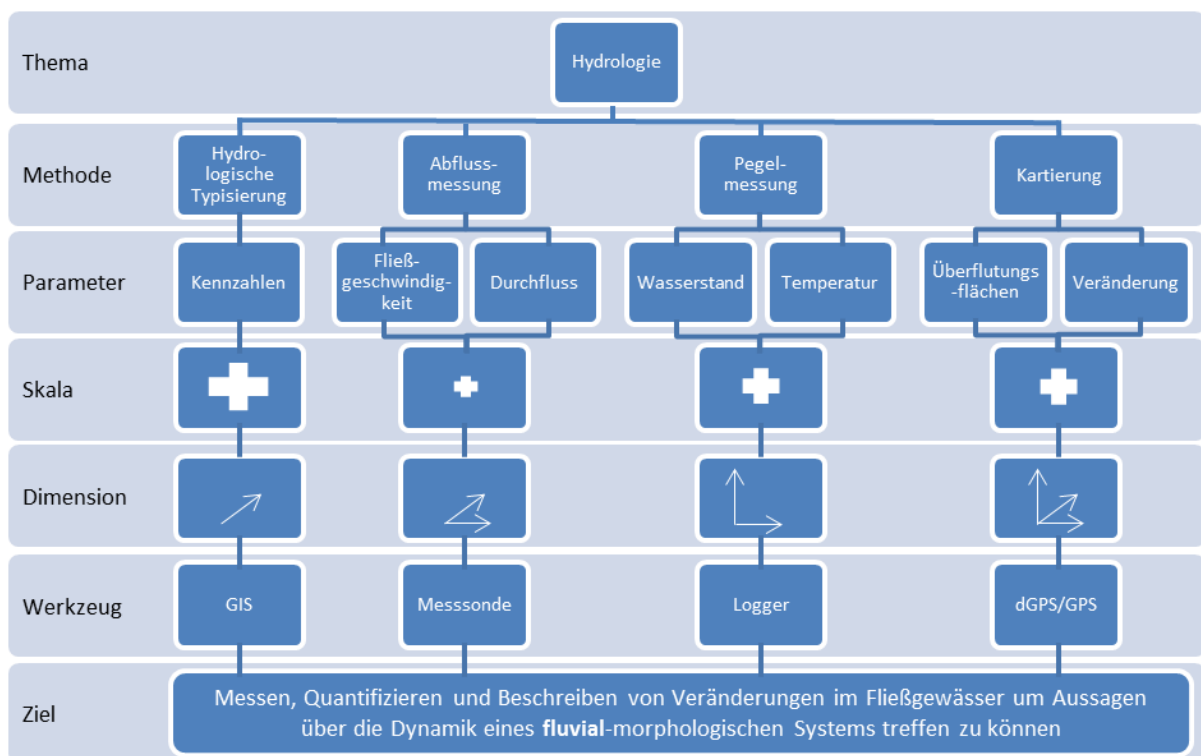


Abb. 3-3: Arbeitsablauf zur Erfassung hydrologischer Prozesse (kleines Kreuz = kleine Betrachtungsebene).

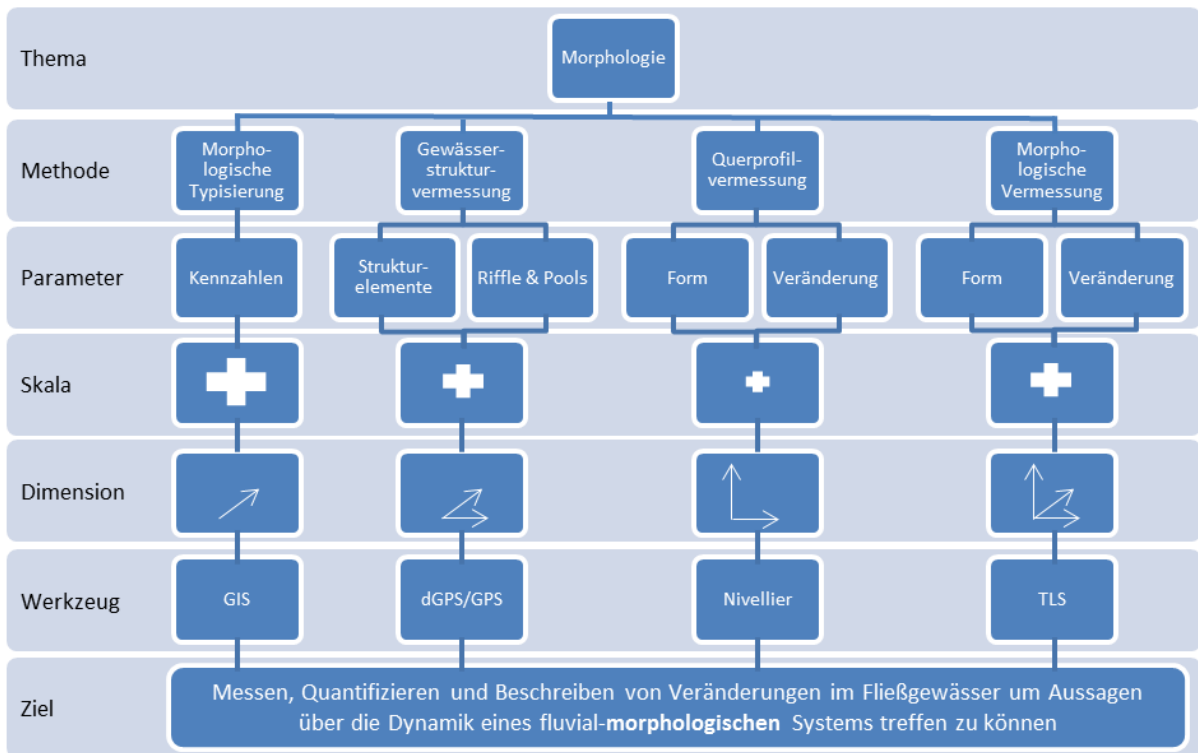


Abb. 3-4: Arbeitsablauf zur Erfassung morphologischer Prozesse (kleines Kreuz = kleine Betrachtungsebene).

In fünf Jahren Monitoring wurde eine enorme Anzahl von Daten aufgenommen, um die oben genannten Prozesse und Formen abzubilden. Alle gesammelten Daten sollen helfen, die in den Donauauen ablaufenden abiotischen Prozesse zu analysieren, aber nicht alle können im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden. Eine gezielte Auswahl soll mögliche Zusammenhänge und das Ineinandergreifen der Zahnräder im Auenökosystem (Kapitel 2, Abb. 2-5) aufzeigen.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als fluvial-geomorphologische Studie mit öko-hydrologischen Aspekten mit Anwendungsbezug zum naturnahen Wasserbau. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf den durch unterschiedliche (Dynamisierungs-) Maßnahmen ausgelösten Prozessen von Erosion, (Transport), Akkumulation und den resultierenden Formen und Gewässerstrukturen. Hauptuntersuchungsobjekt ist ein naturnah angelegtes Umgehungsgewässer durch einen Auwald.

Die Kombination unterschiedlichster Methoden soll methodisch und inhaltlich Lücken schließen, die bisher bei der Gerinnemorphodynamik von naturnahen Flüssen, insbesondere der Sekundärauenentwicklung und bei Renaturierungsprojekten, bestehen.

Für ein besseres Verständnis des Systems muss es nach HEINE (2001) Aufgabe sein, den Gesamtcharakter bzw. die Struktur und Dynamik der Tallandschaften zu erfassen. Und er weist weiter darauf hin,

„daß unsere Fließgewässer und Flußauen nicht das geworden wären, was sie heute sind – und was sie vielleicht schützenswürdig macht –, wenn nicht unsere Vorfahren die Naturlandschaft in eine Kulturlandschaft umgestaltet und immer wieder – beabsichtigt oder unbeabsichtigt – verändert hätten“ (Heine 2001, S. 20).

„Die Geschichte der Beziehungen zwischen dem Menschen und den grossen Flüssen ist somit eine lange Abfolge von Unverständnis, Fehlern und Anpassungen“ (DÉCAMPS & NAIMAN 1989 in GALLANDAT et al. 1993, S. 37, vgl. MARGRAF 2004).

Die vorliegende Arbeit soll einen kleinen Beitrag dazu leisten, mehr Verständnis zu entwickeln, weniger Fehler zu machen und eine möglichst optimale Anpassung der Steuergrößen an kleinen, vom Menschen gestalteten Flüssen zu ermöglichen, um die bevorstehenden Aufgaben auch an den großen Flüssen zu bewältigen.

4. DIE DONAUAUEN ZWISCHEN NEUBURG UND INGOLSTADT

4.1 Naturräumlicher Überblick und geographische Abgrenzung des Projekt- und Untersuchungsgebietes

Die bayerische Donau bildet die Grenze zwischen den naturräumlichen Großlandschaften Alpenvorland (nördliches Alpenvorland) und Deutsches Mittelgebirge. Projektgebiet (PG) und Untersuchungsgebiet (UG) liegen in der naturräumlichen Untereinheit Donauauen, die dem übergeordneten Naturraum des Donaumoos angehört, welches nach der Bundesanstalt für Landeskunde zum Unterbayerischen Hügelland gehört (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962, vgl. LFU 2011A, B (Steckbrief Kulturlandschaftsraum 47 und 48)). Das Ingolstädter Becken oder die Ausräumungslandschaft der Donau (vgl. GRAUL 1943, LANG 1977) wird im Norden, orographisch links der Donau, von den Jurakalken der Südlichen Frankenalb begrenzt. Im Süden geht die Talaue zunächst über die Donauniederterrasse in das Donaumoos, dem größten Niedermoor Süddeutschlands über, an welches das flachwellige Tertiär-Hügelland (Donau-Isar-Hügelland) angrenzt. Das Donautal wird hier als eigener fluvio-glazial-geprägter Naturraum abgegrenzt (BÜTTNER 2003). Die bayerischen Donauauen können wegen der glazialen Schotteransammlungen und dem relativ hohen Gefälle von 0,07% (zwischen Neuburg und Ingolstadt) auch dem Auentyp „gefällereiche Flussauen der Voralpen, mit Sommerhochwassern, Kies-/Schotter-geprägt“ zugeordnet werden (KOENZEN 2005).

Die Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt stellen mit 2.100 ha einen der größten zusammenhängenden Auwaldkomplexe bzw. das zweitgrößte zusammenhängende Hartholzauw-Gebiet in Deutschland dar (MARGRAF 2004), schließen aber die nördlichen Donauauen rund um den Gerolfinger Eichenwald (900 ha) mit ein (Abb. 3-1).



Abb. 4-1: Übersicht über das Auwald-Gebiet, Luftbild (LDBV 2013).

Das vom Aueninstitut Neuburg betrachtete Projektgebiet mit ca. 1.200 ha beschränkt sich auf die südlichen Donauauen, in denen das eigentliche Untersuchungsgebiet liegt. Es umfasst etwa eine Fläche von 400 ha bis 500 ha und konzentriert sich auf die fließgewässernahen Bereiche (Abb. 4-2).

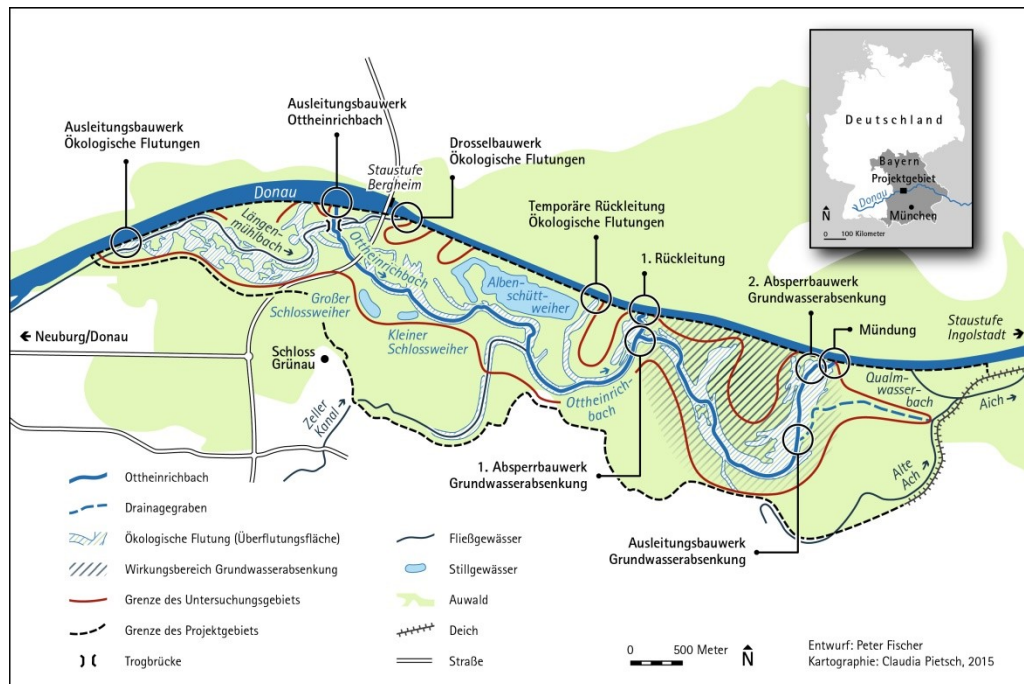


Abb. 4-2: Übersicht über das Projekt- und Untersuchungsgebiet.

Nach der internationalen Donaukilometrierung erstreckt es sich von Flkm. 2.473 im Westen und Flkm. 2.464 im Osten. Es liegt in einem Höhenbereich von 360 m bis 383 m ü. NN bei einer mittleren Höhe von 372 m. Die nördliche Grenze des Untersuchungsgebiets ist die Donau, im Südwesten grenzt es an das Industriegebiet (Grünauer Straße) von Neuburg, im Süden an das Schloss Grünau an und erstreckt sich nördlich der Gemeinden Rohrenfeld und Weichering Richtung Osten. Hier kann die Grenze des PG am einfachsten an der Feld-Wald-Grenze bzw. an der älteren Postglazialterrasse nachvollzogen werden, die sich mit einer Geländestufe absetzt.

Für das Verständnis der hydrologischen und morphologischen Abläufe ist eine umfassende Kenntnis der Ausgangsbedingungen nach Ansicht des Verfassers unerlässlich. Dies erfordert eine ausführliche Darstellung der naturräumlichen Gegebenheiten auf den nächsten Seiten.

4.1.1 Entstehung und Wandel der Donau-Auen-Flusslandschaft im Quartär

4.1.1.1. Flusslaufverlagerung ins Untersuchungsgebiet

Die Folgen der Klimaerwärmung sind immer noch die Topthemen und oft in der öffentlichen Diskussion. Eiszeiten verbinden wir häufig mit tiefen Temperaturen und ausgedehnten Gletschern. Beide – Kaltzeiten und Warmzeiten (Interglaziale) – haben auch die Landschaft

des UG geprägt und beständig verändert – und werden es auch künftig tun. Auch wenn die Donau-Eiszeit, wie der Name schon vermuten lässt, eine besondere Rolle für den Donauroaum spielen muss, beginnt die für die Arbeit bedeutende Phase erst im Quartär mit den beiden letzten Eiszeiten (Riss und Würm).

In dieser Zeit wurde durch wechselnde Klimaverhältnisse insbesondere im letzten Interglazial (127.000-117.000) im Ingolstädter Becken und dem Donaumoos eine Ausräumungslandschaft geschaffen (GRAUL 1943, LANG 1977). Die Anlage von Flussterrassen erfolgte demgegenüber vornehmlich während der Kaltzeiten, da das Wasser zu diesen Perioden in den Gletschern gebunden war und zum Ab- und Weitertransport von Sedimenten fehlte.

Nach der Laufverlagerung der Donau aus dem heutigen Altmühltal über das Schuttertal in das Ingolstädter Becken (SCHAEFER 1966, GLATTHAAR & LIEDTKE 1988), wo sich die Ingolstädter Hochterrasse ausbildete, wechselte die Urdonau ihr Flussbett erneut. Die Neuburger Donau schüttete eine zweite Hochterrasse auf, bevor sie sich dann – wieder weiter nördlich – etwa dem heutigen Lauf entsprechend, der Neuburger Talstrecke annäherte (Abb. 4-3). Bisher wurden die Umlenkungsereignisse und Laufverlagerungen mit der Riss-Eiszeit verknüpft (zuletzt JERZ & PETERS 2002), neue Datierungsmethoden erlauben allerdings eine Einordnung in den letzten Glazialzyklus (FIEBIG & PREUSSER 2003). Mit jeder Laufverlagerung erfolgte auch eine Laufverkürzung von ehemals 119 km auf heute 70 km und damit eine Gefällezunahme mit entsprechender Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit. Vorfluter im Projektgebiet vor der Laufverlegung der Donau waren damals der Neuburger Fluss und die Paar (GRAUL 1943).

Während der Würm-Eiszeit hinterließ die Donau im PG weite Niederterrassenschotterflächen, auf denen später dann in der weitläufigen Talniederung Auelehme bzw. aueähnliche Bildungen (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B) abgelagert wurden. Die „abgesetzten“ Schotter dämmen das Donaumoos vom Donautal ab und bilden mit ihren Terrassen eine Abgrenzung zu den jungholozänen Flussauen (GRAUL 1943, JERZ & PETERS 2002). Die großflächigen Vermoorungen südlich der Donau sind vom Flusslauf durch die bis zu 5 km breite Niederterrasse getrennt, welche sich um 1 m bis 3 m über der Aue und die Vermoorungen erhebt. Erdgeschichtlich handelt es sich damit um einen relativ jungen Flussabschnitt, ohne Unterschied ob man den alten (z.B. GRAUL 1943, SCHAEFER 1966) oder den neuen Arbeiten (DOPPLER et al. 2002, FIEBIG & PREUSSER 2003) Glauben schenken mag, nach denen die Donau erst seit rund 80.000 Jahren statt seit 200.000 Jahren zwischen Neuburg und Ingolstadt fließt.

Zahlreiche Arbeiten beschreiben die historische Flusslaufverlagerung und die Ausbildung von Flussterrassen (GRAUL 1943, TILLMANN 1977, MEYER & SCHMIDT-KALER 1991, NIEDERMEIER 1996, JERZ & SCHMIDT-KALER 1999, SCHELLMANN 1990, SCHIELEIN 2012). Ein Überblick über die Stratigraphie mit Flussgeschichte im jüngeren Quartär ist bei JERZ und PETERS (2002) zu finden. Über Tausende von Jahren entstand eine Vielfalt an Terrassen, Flussschlingen und Altarmen, die noch das heutige Donautal zwischen der Neuburger Enge und der Weltenburger Enge über eine Erstreckung von 50 km und in einer Breite von über 5 km kennzeichnen.

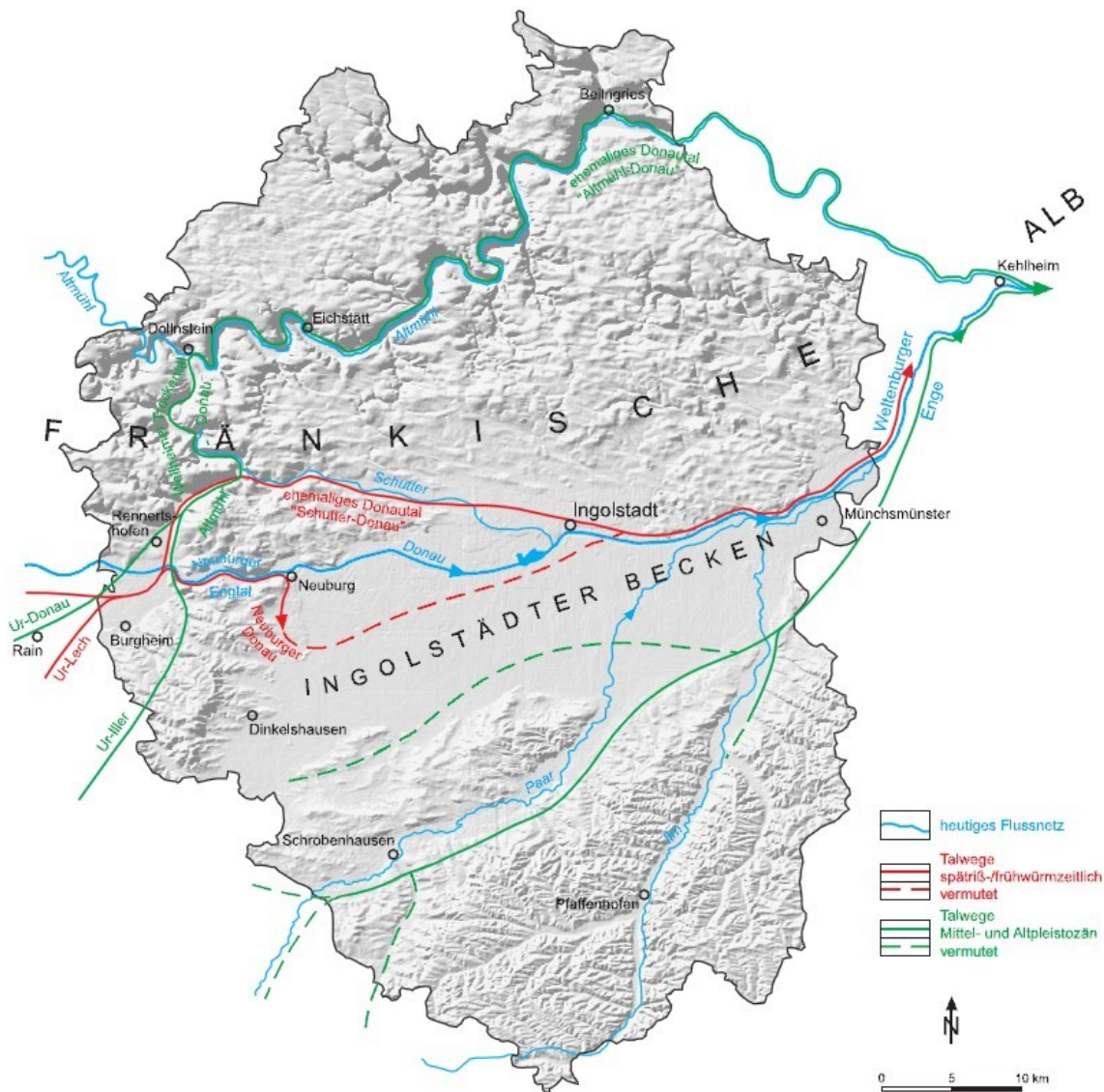


Abb. 4-3: Paläogeographische Übersicht der pleistozänen und heutigen Flusssysteme in der Region (DOPPLER et al. 2002, S. 32).

Zahlreiche geomorphodynamische Vorgänge haben seit der Nacheiszeit in der „geologischen Gegenwart“ unsere heutige Landschaft weiter geformt und verändert. Insbesondere die fluviale Morphodynamik führte und führt auch heute noch in den Flusstälern zu beträchtlichen Umlagerungen (BUCH 1988, SCHELLMANN 1990, JERZ 1993). Zahlreiche Akkumulations- und Erosionsvorgänge haben ihren Anfang im ausgehenden Spätglazial und setzten sich im Holozän fort. Nach BUCH (1988) wird für die Donau eine flusssystemische Sonderstellung postuliert, die vom Klimarhythmus unabhängig ist und vielmehr einem Wirkungsgefüge von externen und internen Steuerungsfaktoren für jede Fließstrecke folgt. Dazu zählen auch anthropogene Einflüsse aus dem jüngeren Zeitabschnitt, die eine große Auswirkung auf die geologisch-morphologische Lagerung der Terrassenbildung haben. Jedoch haben weder diese Einflüsse noch lokale Faktoren Auswirkungen auf die Gesamtzahl der holozänen Umlagerungsperioden (SCHELLMANN 1990). In welchem Umfang aber klimatische, flussinterne und lokale Steuerungsgrößen

(dreigliedriges flussmorphologisches Kräftespiel) für die Entwicklung verantwortlich sind, wird immer wieder von verschiedenen Autoren aufgegriffen und diskutiert (HILGART 1995, BUCH & HEINE 1995, JERZ & PETERS 2002).

Im Würm-Hochglazial herrschte nach Ansicht verschiedener Autoren (JERZ UND SCHMIDT-KALER 1999, KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B) ein weit verzweigtes Flusssystem (braided river) mit glazialen Abflussregime und vertikaler Sedimentation und Erosion. Noch im Verlauf des Spätglazials entwickelte sich ein System verzweigter Rinnen (anastomisierend) (vgl. auch BUCH 1988). Die spätglazialen Terrassen südlich der Donau sind von solchen verzweigten Rinnen durchzogen; sie können als Nebenarme der damaligen Donau gedeutet werden und lassen sich auch im digitalen Geländemodell oder wie hier in den blauen Bereichen der Grundwassermodellierung gut nachvollziehen (Abb. 4-9).

4.1.1.2. Postglaziale Flussdynamik (Holozän) und anthropogene Flussbaumaßnahmen

Ein entscheidender Wechsel im fluvialen Geschehen (interglaziales Regime) erfolgte im Verlauf des Subboreals (5.000 bis 2.800 Jahre vor heute) mit der Entwicklung zu einem Mäanderfluss mit lateraler Umlagerung. Die in nacheiszeitlichen Schotterflächen eingeschnittenen Mäanderterrassen waren Fundstellen von Baumstämmen und weisen damit auf eine erhöhte Umlagerung und Aufschüttung hin (JERZ & PETERS 2002). Die Erosions- und Akkumulationsbereiche dehnten sich bald auf den gesamten Mäandergürtel aus und in der Eisenzeit und Römerzeit entstanden die Auenstufen qh_{1_1} und qh_{1_2} (Abb. 4-6 und 4-7), auf die im Kapitel 4.1.2.2 noch näher eingegangen wird. In dieser Zeit mit erhöhter Umlagerungstendenz und Sedimentation wurde durch umfangreiche Landnutzung (Waldrodung und Getreideanbau) zusätzlich reichlich Feinmaterial vom angrenzenden Umland den Donauauen zugeführt, was PETERS et al. (2002) mit der „prähistorischen Umweltkatastrophe“ umschreiben. Die Flussarmverlagerungstendenz war jetzt am größten.

In poströmischer Zeit wurde die Sedimentverlagerung langsam abgeschwächt und die Ausbildung von Mäandern wurde geringer. Die Donau bildete in der Phase mit geringer fluvialer Aktivität ein breites und flach überströmtes Flussbett aus – etwa so, dass man bei „Niederwasser“ in den meisten Stromstrecken über die Donau waten konnte (MAIER 1914; KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B). In das Mittelalter können die Auenstufen qh_{2_1} und qh_{2_2} datiert werden, in die Neuzeit die Auenstufe qh_3 (vgl. Abb. 4-7). MARGRAF (2004) gibt eine umfassende Beschreibung der einzelnen Zeitabschnitte mit den jeweiligen Veränderungen im Ingolstädter Becken, weitere Details sind in den Darstellungen von JERZ und SCHMIDT-KALER (1999), JERZ und PETERS (2002), (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B) und ARAUNER (2008) zu finden. Die letzten starken Hochwasser in unserer Zeit (wie in den Jahren 1940, 1954, 1965, 1970, 1988, 1999, 2002 (JERZ & SCHMIDT-KALER 1999, MARGRAF 2004) und zuletzt 2005 und 2013) erreichten mit ihren Auflandungen vielfach den gesamten jüngeren Auenbereich (qh_2 und qh_3 , Abb. 4-7). Extreme Hochwasserereignisse der letzten Jahrhunderte sind aus den Jahren 1729, 1819, 1845, 1850, 1862, 1882 und 1899 überliefert (JERZ & SCHMIDT-KALER 1999).

Seit den planmäßigen Flussbaumaßnahmen 1836 (BSLU 1985) haben sich die hydrologischen und morphologischen Bedingungen gravierend verändert, aber schon früher wurde versucht, die Donau zu kontrollieren. Hinweise über frühere Flusslaufbegradigungen finden sich im Stadtmuseum in Ingolstadt (JERZ & SCHMIDT-KALER 1999) und in alten regionalgeographischen Büchern. So schreibt MAIER (1914; vgl. KLEINSCHNITZ & KRÖMER 2003B), dass die Donau früher eine Stunde südlicher von Ingolstadt floss, sowie von einem Rinnsal, welches 1361 gegraben wurde, um die Donau umzuleiten. Zwischen 1363 und 1373 wurde im östlichen UG ein Nebenarm zum Hauptarm umgewandelt (vgl. MARGRAF 2004).

Im 19. Jh. war es Aufgabe des Staates, den Fluss in einem schiff- und flößbaren Zustand zu erhalten. „Als Mittel hierzu wurde damals die Korrektion eines Flusses auf Mittelwasser unter möglicher Begradigung seines Laufes angewandt (BAUER 1965, S. 146).“ In dieser Absicht entstanden um 1825 zwei Durchstiche oberhalb von Ingolstadt. Seit 1790 versuchte man schon, fünf Mäanderschlingen zwischen Neuburg und Ingolstadt zu kürzen (MARGRAF 2004). Weitere größere Flussbegradigungen wurden in den Jahren 1826 und 1830 durchgeführt. Etwas später (1919-1926) als andernorts wurden dann Hochwasserdeiche errichtet.

Die Mittelwasserregulierung an der Donau war 1870 weitgehend abgeschlossen (BSLU 1985). Weitere umfangreiche Flussbaumaßnahmen an der Donau folgten im 20. Jahrhundert, wie an allen anderen großen Flüssen Deutschlands (GALLUSSER & SCHENKER 1992, KONOLD & BECK 1996) oder Europas (DYNESIUS & NILSSON 1994, PETTS et al. 1989, SCHIEMER et al. 1999). 1927 wurde dann die erste Staustufe (Kachlet) an der Donau gebaut. Die Donau selbst, aber auch andere Auengewässer, waren bereits vor dem Bau der Staustufen stark verändert worden. Mit der Errichtung von weiteren Querbauwerken – auch an den Tributären – sowie den Staustufen Ingolstadt (1971) und Bergheim (1970) wurde der natürliche Wandel im Fluss und der angrenzenden Aue endgültig auf ein Minimum beschränkt.

Lag doch das Flussbett vor Beginn der Regulierung um 1800 um 3 m höher (NIEDERMEIER 1967 in MARGRAF 2004) als heute, und wurde die Donau von 5 km auf unter 150 m Breite in Dämme gefasst, wobei die Breite im Verlauf deutlich variiert. Die Breite misst beispielsweise vor der Staustufe Bergheim zwischen 144 m (am Streichwehr) bis zu ca. 235 m (am Ausleitungsbauwerk, im abgedichteten Stauhaltungsdamm), und im Unterwasser beginnt das Regelprofil bei etwa 72 m und steigt auf ca. 100 m Breite an, bevor dann der Donaustausee Ingolstadt auf max. 500 m Breite (max. Stauziel) anwächst. Eine Übersicht über die Veränderungen gibt Tabelle 4-1.

Tab. 4-1: Veränderungen durch menschliche Aktivitäten seit 1825 im Einzugsgebiet der Donau bis zum Pegel Ingolstadt (BSLU 1985, FINSTERER 1996, WAF 1998 in MARGRAF 2004, SCHLEGEL 2000A).

Veränderungen durch die Begradigung (Durchführung von 1825 bis 1870)

Laufverkürzung	17 % des ursprünglichen Laufs
Verengung	Von ca. 5 km auf 150 m
Eintiefung	1,73 m bis zum Jahr 1969
Am Pegel Neuburg	1875-1909: ca. 0,6 m ab 1920: ca. 0,3 m 1940-1960 0,1 m
Erhöhung der Fließgeschwindigkeit	k. A.

Veränderungen durch die Begradigung (Durchführung von 1825 bis 1870)**Veränderungen durch zwei Staustufen (1970)**

Verringerung der Fließgeschwindigkeit	k. A.
Unterbrechung der Durchgängigkeit	
Mittlerer Grundwasserstand in der Aue	Oberwasser Staustufe: Anstieg $\leq 0,75$ m Unterwasser Staustufe: Absenkung $\leq 0,25$ m
Grundwasserschwankung	Reduktion von mehreren Metern auf 0,5 m
Flutung der Aue über ein Überlaufwehr	bei Donauabfluss > 1.250 m ³ /s
Geschiebetransport	heute nur noch Feinsediment, früher auch alpine Schotter

4.1.1.3. Sedimenttransport und Auenrelief

Die Begleitung des Flusslaufs durch ältere Terrassenniveaus zeigt bereits eine Zentralisierung der Donau, die sich auch in den jüngeren Auensedimenten fortsetzt. Die Siedlungstätigkeit und die seit dem Mittelalter vorgenommenen Laufkorrekturen (siehe oben) veränderten die Morphologie und die Auendynamik stark. Spätestens mit der Steinsicherung des Ufers und den uferbegleitenden Deich- und Dammbauten im 19. Jh. ging die Vernetzung von Fluss und Aue dann weitgehend verloren und der Donaulauf ist auf unbestimmte Zeit durch Dämme festgelegt worden. Ausgelöst durch diese Laufverkürzungen grub sich, wie bereits angesprochen, die Donau immer tiefer in ihr Flussbett ein. Durch die Errichtung der Staustufen (Bergheim und Ingolstadt) hoffte man, auch die Tiefenerosion stoppen zu können. So wurde versucht, mit Stauhaltungen andere anthropogene Einflüsse zu korrigieren, die aus früheren Flussregulierungen herrühren. Jedoch ziehen diese Eingriffe auch eine Reihe von ökologisch nicht verträglicher Nebenwirkungen nach sich. Nicht nur die Durchgängigkeit für aquatische Lebewesen (biologische Durchgängigkeit) wird unterbunden, auch die Geschiebe- und Sedimentdurchgängigkeit ist seit der Errichtung der Querbauwerke unterbrochen.

Ehemals haben die Alpenflüsse Iller und Lech mit ihrer hohen Abflussdynamik und ihrem starken Geschiebetrieb das Abflussregime und die Morphodynamik der Donau bestimmt (BSLU 1985, BAUER 1965). Diese Funktion wird jetzt weitgehend von den Staustufen übernommen. Insbesondere der Lech war im Naturzustand sehr geschiebereich, was mit dem Ausbau massiv abgenommen hat. So hat die Gesamtgeschiebezufuhr innerhalb von 20 Jahren von 540.000 m³/a auf 120.000 m³/a abgenommen (BAUER 1965).

Im natürlichen Zustand, den BAUER (1965) aus den Aufnahmeplänen um 1826 und den Pegelstandsbeobachtungen ermittelt hat, betrug die mittlere jährliche Geschiebefracht an der Donau mindestens 60.000 m³/a.

„Der natürliche Donaulauf befindet sich – ungeachtet seiner wasserwirtschaftlichen Mängel – bezüglich der Geschiebebewegung im Gleichgewicht, flußmorphologisch im Zustand der Beharrung (BAUER 1965, S. 146).“

Im ausgebauten Zustand stieg das Transportvermögen durch eine Erhöhung der Erosionskompetenz auf 150.000 m³/a an (BAUER 1965). In der Folgezeit tiefte sich die Donau ein, Ausbaggerungen für gewerbliche Zwecke oder zum Bau von Hochwasserschutz-

dämmen verstärkten den Prozess zunehmend. Die Kiesentnahme verursachte in den Jahren 1913 bis 1940 rund um Ingolstadt eine Eintiefung um etwa 130 cm, die sich auch flussaufwärts fortsetzte (am Pegel Neuburg etwa 30 cm in den Jahren 1920 bis 1940). Die Donau grub sich in den Folgejahren 1940-1960 weitere 10-50 cm ein (Tab. 4-1). Erst 1960 wurden die Entnahmen ganz eingestellt. Die Geschiebefracht betrug in Ingolstadt zum gleichen Zeitpunkt etwa 50.000 bis 60.000 m³/a (RMD 1967). Der Geschiebetransport in der Donau wird mittlerweile spätestens an der Staustufe Bertoldsheim, der ersten in der Stauhaltungskette, Bertoldsheim-Bittenbrunn-Bergheim-Ingolstadt-Vohburg unterbunden. Lediglich bei größeren Hochwassern ist noch mit einem gewissen Geschiebetransport über die Stufen hinaus zu rechnen, der dann vor allem mit einer entsprechend erhöhten Schwebstofffracht einhergeht.

Staustufen bilden während normaler Abflussbedingungen zumindest temporär Schwebstoffsenken, dies kann im Oberwasser der Staustufen zu einer Kolmation des Interstitials führen. Die in Fließrichtung langgestreckte Form eines Stauraumes, wie in Bergheim, begünstigt wiederum die Spülwirkung bei Hochwasser (Untersuchungen speziell zum Stauraum Bergheim sind dem Verfasser nicht bekannt). Die Schwebstoffführung wird für den Zeitraum 1931 bis 1940 in Ingolstadt mit ca. 1.150.000 t (860.000 m³) im Jahresmittel angegeben (BSLU 1985). An der Schwebstoffmessstelle Ingolstadt ist für die Jahresreihe 1971 bis 2000 eine durchschnittliche jährliche Schwebstofffracht von nur mehr 446.945 t (Schwebstofftransport 14,16 kg/s) berechnet worden (LFU 2006, Gewässerkundliches Jahrbuch 2000, für 2006 sind leider keine Daten wegen Systemumstellung verfügbar). Der durchschnittliche jährliche Bodenabtrag im Einzugsgebiet beläuft sich auf 22,34 t/km². Im langjährigen Mittel treten mit den höchsten Abflüssen auch die höchsten Schwebstofffrachten in den Sommermonaten Mai, Juni und Juli auf, die niedrigsten in der Zeit von September bis November. Die größte Konzentration konnte während des Hochwassers 1999 mit 3.786 g/m³ gemessen werden.

Die Ablagerungsbedingungen dieser transportierten Sedimente ließen sich besonders gut bei den durch die Baumaßnahmen entstandenen Aufschlüssen und durch diverse Bohrungen nachvollziehen, können aber auch heute im Gelände beobachtet werden. Großräumig betrachtet wirken Auen nahezu eben, erst bei Vermessungsarbeiten im Feld, oder bei einer genaueren Betrachtung des Digitalen Geländemodells (DGM) fällt die merkliche Differenzierung im Meso- bis Mikorelief auf. Die südlichen Donauauen wirken zuerst weitgehend ausgeglichen und die Höhendifferenzen von mehreren Metern bei Flutrinnen und die teilweise steilen Geländekanten der Terrassen fallen innerhalb des geschlossenen Waldes nicht auf. Das im Laufe der Flussgeschichte herausgebildete Kleinrelief, mit alten Flutrinnen, Geländeerhebungen und Mulden, bestimmt auch noch das heutige Abflussgeschehen bei Hochwasser. Am längsten (bis 1880) unterlag, aufgrund der Nähe zum Hauptstrom, der Bereich der „Alten Donau“ (Abb. 4-17) und ihrer Nebenarme, die Osthälfte des Zeller Kanals und die Flutrinne südlich des Albenschüttweihers (bis 1820) diversen Umlagerungsprozessen bis hin zur Inselbildung (vgl. MARGRAF 2004).

Der Mäanderbogen der „Alten Donau“ weist eine mehrfach gestaffelte Ausprägung von parallelen Rinnen im Gleithangbereich auf und seine Verlagerung nach Norden kann eindrucksvoll auf alten Kartenwerken nachvollzogen werden (MARGRAF 2004).

Die fluviale Morphodynamik der rezenten Flussauen ist auf kleine, lokale Uferanrisse der Donau beschränkt (Abb. 4-4, links). Selten werden durch stärkere Hochwasserereignisse wie 1999 u. 2005 einzelne Erosionsbereiche wie am „Wetterloch“ geschaffen (vgl. MARGRAF 2004), an denen es dann örtlich zu Umlagerungen kommt (Abb. 4-4, rechts).



Abb. 4-4: Fluviale Morphodynamik der rezenten Flussaue. Links: Ausbesserung von lokalen Uferanrissen an der Donau nach Hochwasser (Foto: Peter Fischer, 2011). Rechts: Durch das Hochwasser 1999 entstandener Erosionsbereich das sog. „Wetterloch“, welches dann 2005 wieder neu überprägt wurde (Foto: Aueninstitut, 2009).

Im Projektgebiet sind Gewässer-, Ufer- und gewässernahe Bereiche deutlich durch die Steinschüttung am Donauufer verändert, die Gerinnegeometrie ist entsprechend der technischen Notwendigkeiten, wasserbaulichen Auflagen (Regelprofil) und Vorgaben festgelegt. Weiter im donaufernen Auebereich und entlang der meisten historischen Auengewässer sind die auetypischen Ausprägungen des Kleinreliefs jedoch nahezu unverändert erhalten. Nicht mehr erhalten ist die ursprüngliche Reliefdynamik, sowie die Verbindung vor allem mit naturnahen, hydrologischen Verhältnissen (HERRMANN et al. 2004A).

Mit Ausnahme einiger anthropogen entstandener Formen, v.a. Hochwasserdämme und Deiche, sowie Kiesabbaugruben sind die Geländeformen im PG auf exogene Kräfte zurückzuführen. Allen voran bewirken die durch fluviale Dynamik früherer, natürlicher Flussphasen entstandenen Formen eine standörtliche Differenzierung. Die deutlichsten, auch heute noch gut im Gelände sichtbaren Formen, entstanden durch abgeschnittene Flussschlingen, deren Uferböschungen noch immer markante Geländeformen bilden. Häufig werden diese von Vegetationsstrukturen betont (HERRMANN et al. 2004A). Die Ufer der Gewässer sind überwiegend steil und ohne ausgeprägte Wasserwechselzonen (MARGRAF 2004). Da mit zunehmender Überflutungshäufigkeit und Ausuferung das Relief der Flutrinnen ausgeglichener wird, lassen sich Rückschlüsse auf die Abflussbedingungen und Überschwemmungshäufigkeit ziehen.

4.1.2 Geologie und Boden

4.1.2.1. Geologischer Untergrund

Das Projektgebiet ist durch holozäne Talfüllungen aus fluvioglazialen Schottern geprägt, die aus einer Zeit stammen, in der die Donau verschiedene Flussterrassen ausbilden konnte und ständig ihren Lauf, manchmal auf mehrere Arme verteilt, den jeweilig vorherrschenden Abflussbedingungen angepasst hat. Durch einen dieser Seitenarme wurde der Weg für das neue Umgehungsgewässer gelegt: „ein neuer Fluss auf alten Wegen“. Aus diesem Grund soll das Gerinnebett des neu angelegten Fließgewässers auch sedimentologisch etwas näher betrachtet werden, gerade weil auch die Korngrößenverteilung eine Rolle spielen wird.

Südlich an das Projektgebiet angrenzend folgt ein schmaler Streifen würmeiszeitlicher Schotter der über eine Terrassenkante in das Donaumoos übergeht (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B). Im Norden linksseitig der Donau liegt nur ein schmaler Streifen in den holozänen Talfüllungen. Die höher gelegenen Bereiche rund um den Gerolfinger Eichenwald bestehen aus postglazialen Schottern, miozänen Ablagerungen sowie Ausläufern des Malm der Südlichen Frankenalb, der unter das sandig-schluffige und mergelig-tonige Tertiär mit seiner quartären Auflage abtaucht (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B). Im geologischen Schnitt von NIEDERMEIER (1996, in JERZ & SCHMIDT-KALER 1999) oder von FREYTAG-LORINGHOFEN (2000) von der Frankenalb zum Tertiär-Hügelland ist der Aufbau und das Abtauchen der Schichten dargestellt (Abb. 4-5).

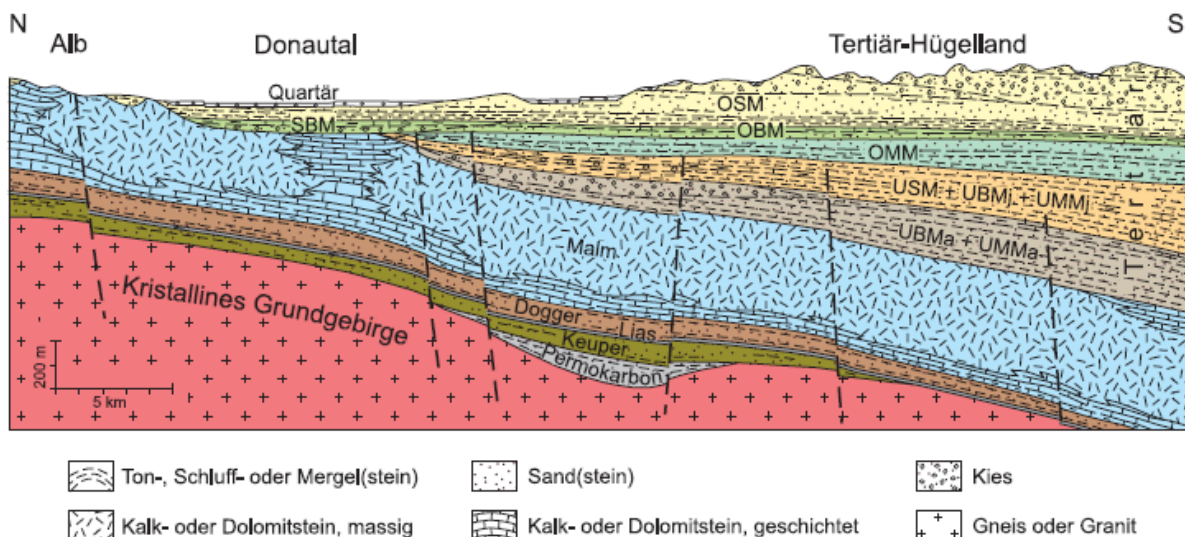


Abb. 4-5: N-S-Profil (schematisch) zeigt den geologischen Aufbau im Projektgebiet (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B).

Unter den Flussschottersedimenten (Sande und Kiese) sind miozäne Feinsedimentablagerungen der Süßwassermolasse zu finden. Der geologische Untergrund wird von dem nach Süden abtauchenden Jura und den Keupersandsteinen gebildet (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003B) Erst bei etwa 300 m unter NN ist bei Ingolstadt das alte kristalline Grundgebirge anzutreffen.

4.1.2.2. Postglaziale Terrassenkörper und Überflutungsflächen

Alt- bis mittelholozäne Flussschotter der oberen Auenstufe und der Übergang zu einem interglazialen Abflussregime mit lateraler Sedimentumlagerung führten zu den noch heute im Gelände erkennbaren Terrassen. Diese begleiten streckenweise den neuen Gewässerlauf. In den leicht ausräumbaren Sedimenten des Ingolstädter Beckens konnte die mäandrierende Donau mehrere Stufen ausbilden, die von einer oder mehreren Terrassen aufgebaut werden. Eine chronologische Abfolge von mehreren Auenterrassen (JERZ 1993, (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003A) (Abb. 4-6) lässt sich über weite Bereiche entlang der Donau nachvollziehen (SCHELLMANN 1990) und dadurch eine übereinstimmende Terrassengliederung durchführen. Bis zu sieben im Postglazial ausgebildete Terrassen können unterschieden werden.

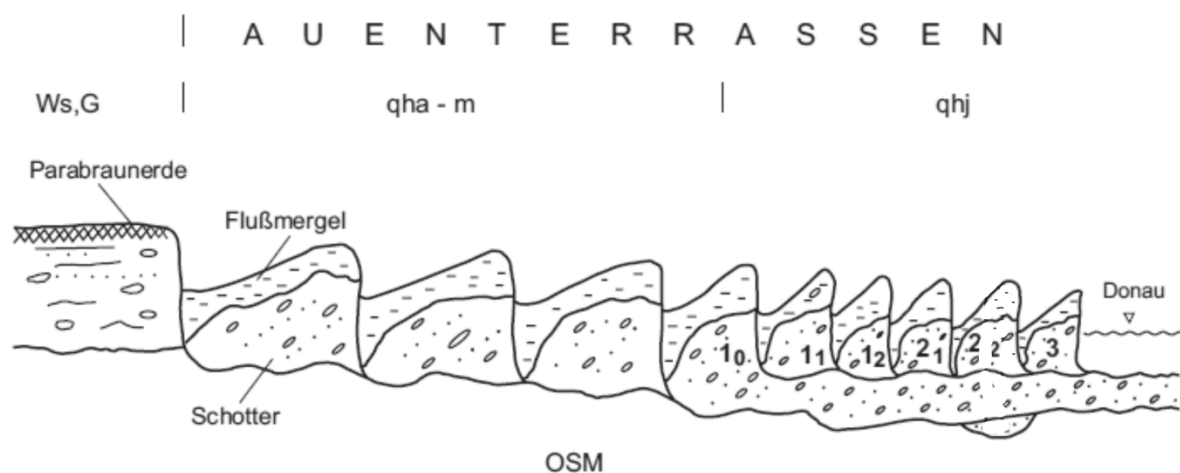


Abb. 4-6: Schematische Darstellung der Auenterrassen im Untersuchungsgebiet (leicht verändert) (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003A).

Diese Auenterrassen unterscheiden sich durch Höhenlage, Bodenbildung und Bodenfarbe. Für die vorliegende Fragestellung spielt eine zentrale Rolle ob sie ganz, teilweise oder gar nicht hochwasserfrei bleiben, bedingt durch die unterschiedlichen Höhenniveaus.

Das Projektgebiet liegt hauptsächlich im Bereich der jüngeren und jüngsten Postglazialterrassen, die noch relativ wenig verwittert sind. Nur am Rand im südwestlichen Bereich der „Pionierbrücke“ und südlich der „Alten Donau“ (Abb. 4-17) werden die Terrassen der ältesten Auenstufe angeschnitten (Abb. 4-7). Diese gehen dann in die alt- bis mittelholozänen Flussschotter über.

Diese Terrassen können noch weiter differenziert werden, worauf bei der Interpretation der Überflutungsflächen in den Kapiteln 6.1.2 und 7.1.3 zurückgegriffen werden soll. An dieser Stelle sei auf die Geologische Karte Blatt 7233 Neuburg a. d. Donau verwiesen (Abb. 4-7, (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003A). Der folgenden Text orientiert sich an der etwas sperrigen, aber gängigen Bezeichnung der Geologischen Karte, um eine zusätzliche Bezeichnung zu vermeiden. Es folgen im Ergebnisteil Aussagen zur flächenhaften Überflutung einzelner Terrassenstufen.

Bis zu vier verschiedenen Einheiten (qha-mG, qhj1, qhj2, qhj3) mit Untereinheiten (qhj1₁, qhj1₂) aus Schluff und Feinsand oder mit dem Zusatz „G“ (z. B. qhj2_{2G}) für Kies mit einer Schluff-Feinsanddecke unterschiedlicher Mächtigkeit über Kies können in der jungen Auenstufe unterschieden werden:

- jüngere Postglazialterrasse mit älteren Auenablagerungen (qhj1₁, qhj1₂): diese Ablagerungen grenzen meist im Süden direkt an das UG an oder reichen nur sehr kleinflächig in das UG hinein, wie z. B. südwestlich der „Pionierbrücke“.
- jüngere Postglazialterrasse mit jüngeren Auenablagerungen (qhj2₁, qhj2₂): über weite Strecken fließt das neue Umgebungsgewässer an dieser Terrassenkante entlang bzw. wird von ihr am rechten Ufer begrenzt. Damit ergeben sich zum Teil beträchtliche Höhenunterschiede von > 3 m von der Sohle bis zur Kante.
- jüngste Postglazialterrasse mit jüngsten Auenablagerungen (qhj3): sie ist zwischen Donau und OHB ausgebildet und zieht im Bereich der „Alten Donau“ am weitesten nach Süden.

Datierungen lassen vermuten, dass die Terrasse qhj1₁ noch vor unserer Zeitrechnung ausgebildet wurde und die Terrasse qhj1₂ kurz nach Chr.

Die tieferen Auenterrassen (qhj1-Flächen) wurden auch lange nach ihrer Bildung noch von Hochwasserereignissen erreicht, durch die es wiederholt zur Auflandung von Auensedimenten kommen konnte. Im Juni 1940 (JERZ & SCHMIDT-KALER 1999) wurden die tiefer gelegenen Flächen der Einheit qhj1₂ letztmals bei einem großen Hochwasser überflutet. Nach Margraf (2004) waren sie 1999 flach überflutet. Die jungen und jüngeren Auenablagerungen (qhj2₁) wurden zu einem großen Teil noch im März 1965 überflutet, die qhj2₂ Flächen auch noch nach Fertigstellung der Staustufe Bergheim (1969) und Ingolstadt (1971) (JERZ & SCHMIDT-KALER 1999). 1999 waren alle nicht ausgedeichten Flächen überflutet (MARGRAF 2004). Donaunahe Bereiche und große Teile der qhj3-Flächen wurden auch bei mittleren Hochwasserereignissen wie 2002 und 2005 und zuletzt 2013 überflutet. Bei kleinen Hochwassern trifft dies auch auf niedrig gelegene Bereiche im östlichen PG zu (siehe Kapitel 6.1.2).

Bis zur Umsetzung der Dynamisierungsmaßnahmen konnten nur noch Hochwasserereignisse mit einem Abfluss von ca. 1.250 m³/s oder größer die Aue über ein Überlaufwehr (Abb. 3-14) im Oberwasser der Staustufe Bergheim erreichen. Wechselfeuchte Flutrinnen wurden meist erst bei HQ₁₀ durchströmt (MARGRAF 2004).

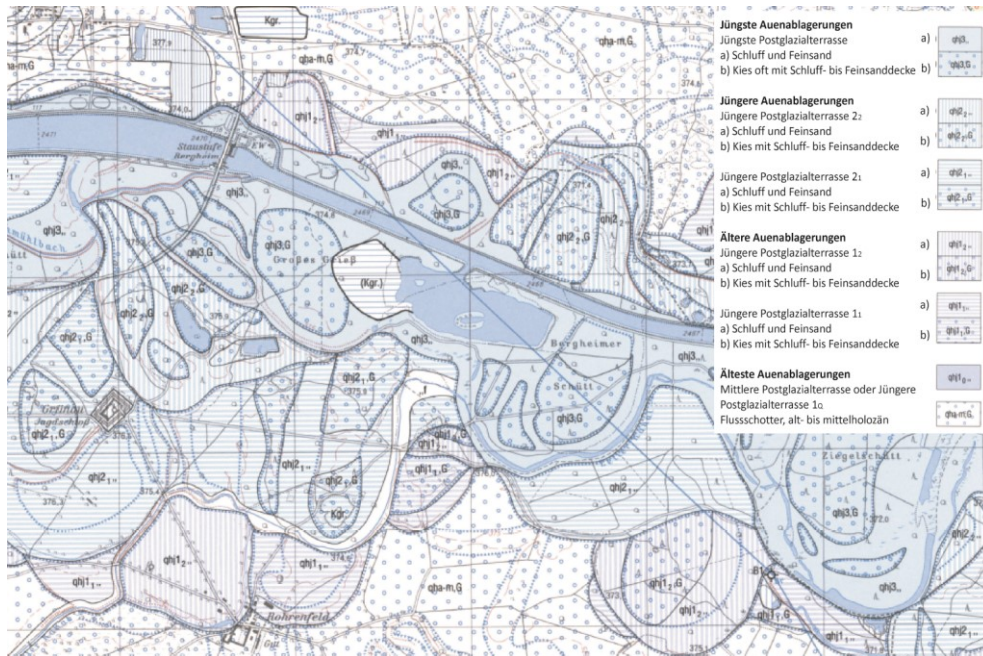


Abb. 4-7: Ausschnitt aus der Geologischen Karte 7233 Neuburg (KLEINSCHNITZ UND KRÖMER 2003A).

4.1.2.3. Böden

Die auf den jüngeren holozänen Terrassen abgelagerten Auensedimente im PG sind bisher kaum verwittert (FREYTAG-LORINGHOFEN 2000). Die Bodenbildung befindet sich noch im Initialstadium und die Reifung wird durch Hochwasserereignisse regelmäßig unterbrochen. Der Großteil der Böden (Sedimente) wird von Auenlehm aus feinkörnigen Sedimenten wie feinsandigem Schluff oder reinem Schluff mit geringen Tonanteilen gebildet. Wie schon für die Aue selbst gibt es für den Begriff „Auenlehm“ verschiedene Definitionversuche. THOMAS (1993) stellt zusammenfassend fest, dass es sich für Mitteleuropa um ein quasi natürliches, jüngeres Hochflutsediment handelt.

Typische Auenböden sind durch zwei wesentliche Standortfaktoren geprägt: zum einen von einem stark schwankenden Grundwasserstand mit stark wechselndem Redox-Potential, erkennbar am mittlereren Grundwassereinfluss (rostfleckige Go/Gr-Horizont mehr als 0,8 m unter der Geländeoberfläche). zum anderen durch periodische Überschwemmungen, Umlagerungen mit Sortierung der Korngrößen und Sedimentationsphasen (vgl. MIEHLICH 2000).

Im PG sind die Böden durch einen relativ hohen Karbonatgehalt gekennzeichnet, der sich aus den Liefergebieten und dem Ausgangssubstrat (Flussschluff aus dem Kalkalpin, den Moränenablagerungen, etc.) erklären lässt. Damit sind Kalkpaternia und Rambla vorherrschend (STIMM 2008). Unterbrochen sind diese jungen Kalkauböden von trockenen Kiesinseln („Brennen“) mit sehr gering mächtiger Humusauflage.

Auswertungen, die im Rahmen der bodenkundlichen Erhebung von FREYTAG-LORINGHOFEN (2000) erfolgten, kennzeichnen das PG mit 87,9 % Auenlehme zzgl. 0,1 % Auenlehme mit humosen Anteilen, weitere 10,8 % der Flächen werden von Kiesen eingenommen und 1,2 % von Sanden.

Die Verteilung der Korngrößen ist stark von den ehemaligen Strömungsverhältnissen und dem Verlauf der Flussschlingen der frei fließenden Donau geprägt. Die mitgeführten Sedimente lagerten sich großflächig aufgrund reduzierter Fließgeschwindigkeit bei Hochwasser außerhalb von Flutrinnen ab, teilweise können sie auch durch Vegetation ausgekämmt werden. Sandablagerungen (oft in Form von Uferwällen) sind überwiegend in den direkt am Ufer überströmten Bereichen mit ehemals höherer Fließgeschwindigkeit zu finden. Die Böden mit hohem Kiesanteil deuten engen Kontakt mit häufig durchströmten und dynamischen Flussabschnitten an, sie sind Relikte der ehemaligen Kiesbänke und Flussinseln, die durch Ablagerungen gegen Ende der letzten Eiszeit entstanden sind.

Die Wasserversorgung der Böden ist sowohl abhängig von der Bodenart, dem Grundwasserflurabstand als auch von der Bodenmächtigkeit. Nach FREYTAG-LORINGHOFEN (2000) nehmen gut wasserversorgte Böden (speicherfrisch, grundfrisch und grundfeucht), gemessen an ihrem Wassergehalt, mit 55,2 % den größten Anteil der Böden im Projektgebiet ein.

Weitere Ausführungen zu den Böden und zum Bodenwasserhaushalt im PG sind bei MARGRAF (2004) und STIMM (2008) zu finden.

4.1.3 Gewässer

4.1.3.1. Abflussregime der Donau

Die Donau, der zweitgrößte und zweitlängste Fluss in Europa, hat im Projektgebiet noch ein relativ kleines Einzugsgebiet von 20.001 km² (bezogen auf den Pegel Ingolstadt Luitpoldstraße) (LFU 2014). Der Abfluss der Donau ist stark von den drei alpinen Zuflüssen Iller, Wertach und Lech geprägt, hinzu kommen noch die kleineren, auch aus Süden mündenden Flüsse wie Günz, Mindel, Zusam und Schmutter. Aber auch von Norden werden über die Wörnitz zum Teil erhebliche Wassermengen zugeliefert. Oft kommt es dabei zu Überlagerungen der einzelnen Abflussbeiträge der Nebenflüsse, was nicht selten zu mehrgipfligen Ganglinien führt. Es lassen sich dennoch die Hochwasserereignisse nach Entstehung und Ablauf vereinfacht in zwei Klassen unterscheiden.

Im Frühsommer treten aufgrund der Schneeschmelze in den Alpen, meist in Verbindung mit Regen, Spitzenabflüsse auf. Extreme Sommerhochwasser entstehen oft durch Vb-Wetterlagen, die auch in den Mittelgebirgsregionen und dem Flachland zu ausgeprägten langanhaltenden Niederschlagsereignissen führen.

Hinzu kommen aus dem außeralpinen Bereich die langanhaltenden Regenfälle in Verbindung mit Warmlufteinbrüchen und Schneeschmelze, manchmal noch bei gefrorenem Boden im Winter, die zum komplexen Abflussregime beitragen (BSLU 1985, LFU 2008A).

Niedrigwasserzeiten sind im Spätherbst und Frühwinter zu erwarten (LFU 2014). Niedrigwasser tritt an der oberen Donau (bis zur Mündung der Wörnitz) von August bis Oktober, mit einem Minimum im September auf. In den Alpen kommt es erst im Spätherbst

und Winter, mit einem Minimum im Januar, zu diesen Situationen. Den Einzugsgebieten entsprechend, folgen die Niedrigwasserphasen aufeinander, überlagern sich jedoch nur im Oktober, weswegen dieser Monat die Zeit mit den geringsten Abflüssen darstellt.

Die Abflüsse bzw. Durchflüsse (in der Arbeit meist gleichbedeutend verwendet) der letzten 30 Jahre werden in Abbildung 4-8 gezeigt.

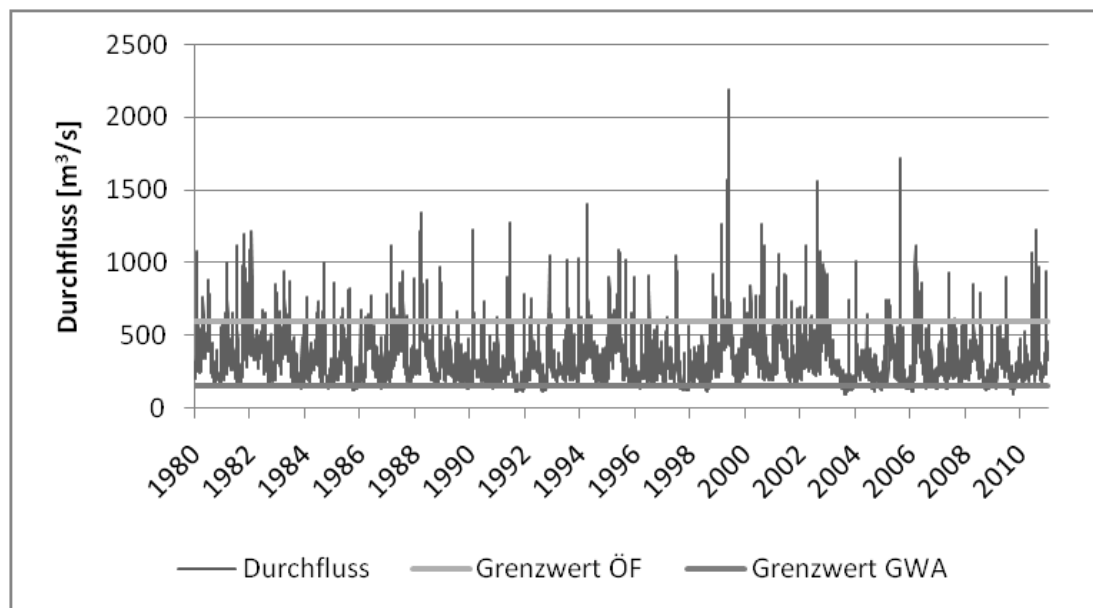


Abb. 4-8: Durchfluss Q in m^3/s am Pegel Ingolstadt (Luitpoldstraße) von 1980 bis 2010 (Tagesmittelwerte, Daten WWA-Ingolstadt). Die beiden Linien markieren die Grenzwerte für die Dynamisierungsmaßnahmen: Ökologische Flutung (ÖF) und Grundwasserabsenkung (GWA), die weiter unten in Kapitel 4.2.1 näher beschrieben werden.

Die hydrologischen Kennzahlen der Donau, bezogen auf den Pegel Ingolstadt mit einem Einzugsgebiet von 20.001 km^2 , sind der Tabelle 4-2 zu entnehmen. Neben der langen Zeitreihe (1924 bis 2014) erfolgte auch eine Berechnung der letzten fünf Jahre.

Tab. 4-2: Gewässerkundliche Hauptzahlen (Pegel Ingolstadt Luitpoldstrasse, Daten LFU-GKD 2015).

Hydrologische Daten (1924-2014)	Zeitreihe/Datum	
Niedrigster Durchfluss (NNQ)	62 m^3/s	11.01.1954
Niedrigwasser Durchfluss (NQ)	105 m^3/s	2010-2014
Mittlerer niedrigster Durchfluss (MNQ)	131 m^3/s	1924-2014
Mittlerer niedrigster Durchfluss (MNQ)	137 m^3/s	2010-2014
Mittlerer Durchfluss (MQ)	312 m^3/s	1924-2014
Mittlerer Durchfluss (MQ)	303 m^3/s	2010-2014
Mittlerer Hochwasser Durchfluss (MHQ)	1.120 m^3/s	1924-2014
Mittlerer Hochwasser Durchfluss (MHQ)	1.076 m^3/s	2010-2014
Hochwasser Durchfluss (HQ)	1.520 m^3/s	2010-2014
Höchster Hochwasser Durchfluss (HHQ)	2.270 m^3/s	24.05.1999

Die Ausbauleistung der Staustufen Ingolstadt und Bergheim beträgt $500 \text{ m}^3/s$, damit wird der Durchfluss $< 500 \text{ m}^3/s$ je nach Strombedarf im Schwellbetrieb geregelt. Dadurch ergibt sich eine Reihe von unnatürlichen hydrologischen Bedingungen (Änderung der Abflussdynamik,

des hydraulischen Gefälles und der Konnektivität zwischen Aue und Donau). Die Staustufe Bergheim beeinflusst den westlichen Bereich. Die Staustufe Ingolstadt, zwar über 4,8 km östlich des UG gelegen, beeinflusst über Rückstauprozesse den östlichen Teil des UG (Stauziel 369,5 m ü. NN, Staulänge 10,7 km). Mit einer maximalen täglichen Absenkung des Wasserstandes von 1,5 m (in Ingolstadt) treten auch weit im donaufernen Teil des UG noch Wasserspiegelschwankungen infolge des Schwellbetriebs auf.

In Niedrigwasserzeiten wird der Abfluss aus Grundwasserzuflüssen gebildet, zusätzlich erfolgt eine gesteuerte Niedrigwasseraufhöhung durch die Speicher (insbesondere Forggensee). Nach dem Bayerischen Niedrigwasserinformationsdienst (LFU 2015B) handelt es sich heute um Niedrigwasser, wenn der aktuell gemessene Wert geringer als 75 % aller Abflüsse ist, die über einen längeren Zeitraum (>30 Jahre, meist bezogen auf den aktuellen Monat) gemessen wurden. Am Pegel Ingolstadt konnte an durchschnittlich 131 Tagen pro Jahr Niedrigwasser laut oben genannter Definition (235 m³/s) und an durchschnittlich 30 Tagen pro Jahr Abflüsse geringer als 150 m³/s festgestellt werden.

In der Tabelle 3-3 werden die Wahrscheinlichkeiten für Hochwasser und Niedrigwasser mit den Daten vom Pegel Ingolstadt (WWA-Ingolstadt, LFU-GKD 2015) für unterschiedliche Zeiträume (Jahresreihen) und unterschiedliche Verteilungsfunktionen dargestellt. Der Unterschied ergibt sich aus der Wahl der Verteilungsfunktion und der Länge der Zeitreihe. Die eigenen Berechnungen erfolgten grundsätzlich mit der Gumbel-Verteilung, zum Vergleich einmal mit der Log Pearson III-Verteilung, nach PONCE (1989), vgl. (DVWK 1999). Dabei wird der Einfluss der unterschiedlichen Jahresreihen deutlich, die auch eine Verschiebung der Werte durch diverse Flussbaumaßnahmen erkennen lassen. Während vor 1970 die Hochwasserabflüsse für ein HQ₂ und HQ₅ niedriger ausfielen, sind sie nach 1970 höher. Ab einem HQ₁₀ dagegen ist der berechnete Hochwasserabfluss für die entsprechende Eintrittswahrscheinlichkeit für die erste Periode größer als für die zweite Phase nach Regulierungsmaßnahmen.

Tab. 4-3: Hochwasserabflüsse (HQ) und Niedrigwasserabflüsse (NQ) vorgegebener Wiederkehrzeiten in m³/s (Eigene Berechnungen erfolgten generell mit der Gumbel-Verteilung bzw. Log III Pearson, nach PONCE (1989), Daten (LFU-GKD 2015)).

Hochwasser											
Pegel	HQ₂	HQ₅	HQ₁₀	HQ₂₀	HQ₂₅	HQ₅₀	HQ₁₀₀	HQ₂₀₀	HQ_{500/} *1000	Jahres- reihe	Quelle
Ingolstadt	1090	1350	1600	1850		2100	2300	2500	2800	1845/1965	BSLU 1985
Ingolstadt	1150	1320	1520	1700		1930	2100		2600*	1924/2012	LfU (NID/HND)
Ingolstadt	1029	1304	1487		1718	1889	2059	2228		1924/2012	Eigene Berechnung
Ingolstadt	1029	1307	1491		1724	1897	2068	2239		1924/2014	Eigene Berechnung
Ingolstadt	1017	1319	1520		1772	1960	2146	2332		1924-1970	Eigene Berechnung
Ingolstadt	1057	1332	1513		1743	1914	2083	2252		1970-2014	Eigene Berechnung
Ingolstadt	1035	1297	1463		1667	1816	1962	2108		1924/2014	Eigene Berechnung (mit Log III Pearson)

Niedrigwasser								
Pegel	NQ ₂	NQ ₅	NQ ₁₀	NQ ₂₀	NQ ₂₅	NQ ₅₀	Jahresreihe	Quelle
Ingolstadt	126	99	85	74		63	1931/1982	BSLU 1985
Ingolstadt	156	116	86		73	64	1924/2014	Eigene Berechnung

4.1.3.2. Weitere Oberflächenwasserkörper

Fließgewässer

Im Untersuchungsgebiet befinden sich neben der Donau noch weitere Fließgewässer, wovon nur die beiden größeren Einfluss auf den OHB nehmen:

- Längenmühlbach (LMB): entspringt am Nordwestrand des Donaumooses, er wurde nach dem Bau der Staustufe Bergheim als Entwässerungsgraben genutzt. Die Angaben bei DISTER (1997), die sich auf den Pegel in Hardt beziehen, sind für das UG nur eingeschränkt zu gebrauchen. Die Zuleitung der Kläranlage und das von der Donau zufließende Qualmwasser sind nicht enthalten. Damit wird der MQ mit 0,18 m³/s deutlich unterschätzt. Der MQ liegt nach (SCHLEGEL 2004) an der Mündung bei etwa 0,8 m³/s.
- Zeller Kanal (ZK): entspringt im Donaumoos, die Wasserführung (besonders im Südwesten) ist stark von Niederschlägen abhängig und periodisch (teilweise Austrocknung im Sommer). Von West nach Ost nimmt besonders während der Trockenzeit der Fließgewässercharakter immer weiter ab. Für die zur Verfügung stehende Zeitreihe (01.04.2010-13.02.2013) vom Pegel Bruck konnte ein mittlerer Abfluss von 0,3 m³/s errechnet werden. Die gesamte Spannweite reicht von 0,03 m³/s bis zu 1,77 m³/s und zeigt die extrem stark Variabilität der Abflüsse.

Weitere binnenseitige Gewässer sind vor allem während Hochwasserereignissen und Ökologischen Flutungen sowie der sich darauf einstellenden Grundwasserverhältnisse relevant:

- Rechter Entwässerungsgraben, später Aich: Als Vorflutgraben der ausgedeichten Bereiche um die Staustufe Ingolstadt zeigt er ab dem Sielbauwerk durch Grundwasserzustrom einen relativ ausgeprägten Fließgewässercharakter mit ca. 0,5-1,5 m³/s (MARGRAF 2004).
- Alte Ach, nördlich Weichering: trockenliegender Gewässerlauf, der erst ab der Brücke beim Hochwasserdeich eine episodische Wasserführung (Tümpel) aufweist; ab Mündung des neuen Drainagegrabens: Übergang zu einer temporären Wasserführung. Die Alte Ach wird bei Hochwasser bzw. Ökologischen Flutungen > Stufe 3 (siehe Kapitel 6.1.1.6) über das Altarmsystem mit Wasser versorgt.
- Qualmwasserbäche (Gießen): im Bereich der Stanglettenschütt, Grundwasser-austritte mit Entwässerung zum Sielbauwerk mit teilweise perennierendem Fließgewässercharakter, teilweise künstlich mit temporärer Wasserführung.

Stillgewässer

Im Untersuchungsgebiet gibt es drei größere Weiher (Albenschüttweiher, Großer und Kleiner Schlossweiher), die anthropogen durch Kiesabbau entstanden sind. Alle drei sind grundwassergespeist und haben keine oberflächlichen Zuflüsse. Stellenweise kommen auch wechselfeuchte Kiesgruben vor.

Weiterhin befinden sich im PG zahlreiche permanent oder temporär wasserführende Tümpel und Flutrinnensysteme sowie abgetrennte Flussschlingen, die vor allem bei Hochwasserereignissen durch Oberflächenwasser überflutet und/oder durch ansteigendes Grundwasser aufgefüllt werden. Eine Unterscheidung der verschiedenen Auengewässer erfolgt in Kapitel 5.1.1.1 Weitere Angaben sind der Machbarkeitsstudie zum Projekt zu entnehmen (DISTER 1997).

4.1.3.3. Grundwasser

Hydrogeologisch gehört das PG zum Teilraum der Fluvioglazialen Schotter, die zum Großraum Alpenvorland zu rechnen sind. Die Schotterkörper der Donau weisen eine hohe Durchlässigkeit auf und stellen ergiebige Grundwasserleiter für die Region dar. Hauptlieferant der vorwiegend karbonatischen Sedimente sind bzw. waren die Nördlichen Kalkalpen (BÜTTNER 2003).

Der Grundwasserleiter im PG wird dementsprechend aus quartären Sedimenten (Kiese und Sande) gebildet. In ihnen ist das oberste Grundwasserstockwerk ausgebildet (BÜTTNER 2003). Die mittlere Mächtigkeit dieses Aquifers schwankt zwischen 5 m und 10 m und wird in weiten Bereichen durch eine überwiegend gering mächtige und wenig durchlässige Auenlehmschicht überdeckt (BÜTTNER 2003). Die nicht-grundwasserleitenden Schichten (Aquiklude) darunter bestehen aus tonig-mergeligen tertiären Ablagerungen und besitzen eine Mächtigkeit von ca. 50 m bis 80 m. Sie können als undurchlässige Basis des Quartäraquifers angenommen werden.

Als Folge der Begradigung lagen die mittleren Grundwasserstände vor dem Staustufenbau deutlich unter dem Geländeniveau. Durch den Bau der Staustufen stieg das Grundwasser im Oberwasser beider Staustufen an, wohingegen der Grundwasserspiegel im Unterwasser der Staustufe Bergheim (Fallhöhe 6 m) sank. Die bis 1968 üblichen Grundwasserschwankungen von mehreren Metern wurden durch den Staustufenbau auf etwa einen halben Meter reduziert (SCHLEGEL 2000A). Der Staustufenbau führte größtenteils zu einer trockeneren Donauaue, tiefgelegene Standorte im Rückstaubereich der Staustufen wurden aber teilweise dauerfeucht.

Die Fließrichtung des Grundwassers war vor Staustufenbau fast rechtwinklig zur Donau, seitdem fließt es dagegen eher parallel (HERRMANN et al. 2004A). Die mittlere GW-Neubildungsrate liegt bei 4-7 l/s*km² (BÜTTNER et al. 2002). Die Stauhaltungen sind, wie bereits erwähnt, durch Dämme abgedichtet, unterhalb Bergheim bis ca. Flkm. 2.864 ist die Grundwasservorflut zur Donau gewährleistet (RMD CONSULT 2004B). Im überwiegenden Teil

des PG ist eine freie Grundwasseroberfläche in den Talschottern ausgebildet. Diese ist weitgehend identisch mit den Wasserspiegellagen in den Oberflächengewässern. Die Verhältnisse werden in Abbildung 4-9 beispielhaft für den Juli 2011 dargestellt.

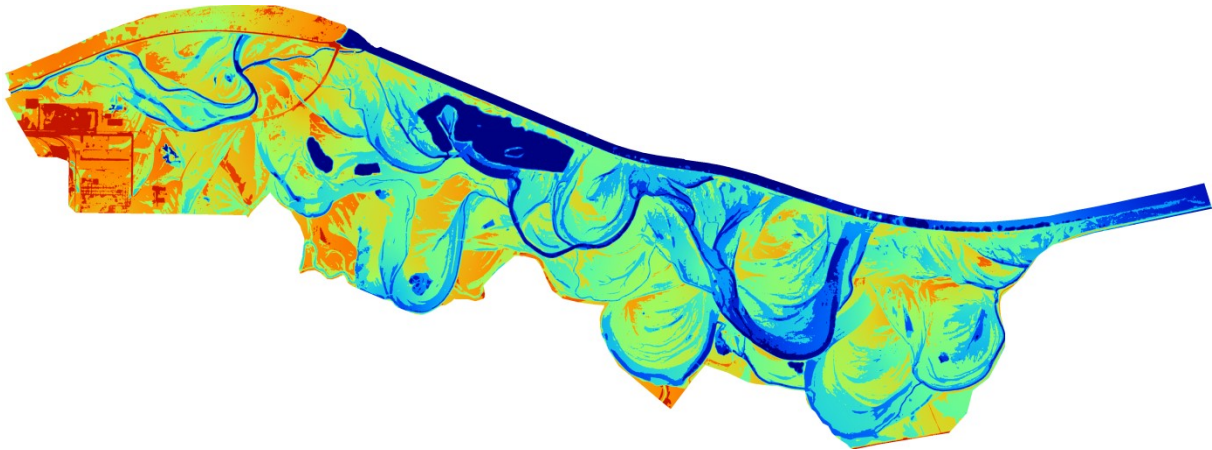


Abb. 4-9: Grundwassermodellierung mit den in Abb. 4-10 dargestellten neun Grundwassermessstellen für den Monat Juli 2011, Quelle: Aueninstitut.

In Bereichen mit einer Auenlehmdeckschicht kann es aber auch zu gespannten Grundwasserverhältnissen kommen, wenn die Piezometerhöhen die Deckschichtunterkante übersteigen. Dann breiten sich Druckschwankungen wesentlich schneller aus als unter freien Verhältnissen (RMD CONSULT 2004B).

Seit 1999 finden keine flächendeckenden regelmäßigen Ablesungen der ca. 100 Grundwassermessstellen (GWM) statt, die im Rahmen des Staustufenbaus zwischen Neuburg und Ingolstadt errichtet worden sind (RMD CONSULT 2004B). Neun GWM werden vom WWA Ingolstadt in Verbindung mit dem Dynamisierungsprojekt betrieben. Mit diesen Messstellen soll die Veränderung seit der Inbetriebnahme des OHB aufgezeigt werden (Abb. 4-10). Je nach Standort kann ein mäßiger bis deutlicher Anstieg des Grundwasserspiegels durch die Dynamisierungsmaßnahmen nachgewiesen werden. Im zentralen Teil des UG sind die Grundwasserstandsschwankungen am größten. Weitere Ausführungen sind bei FISCHER et al. (in press) zu finden.

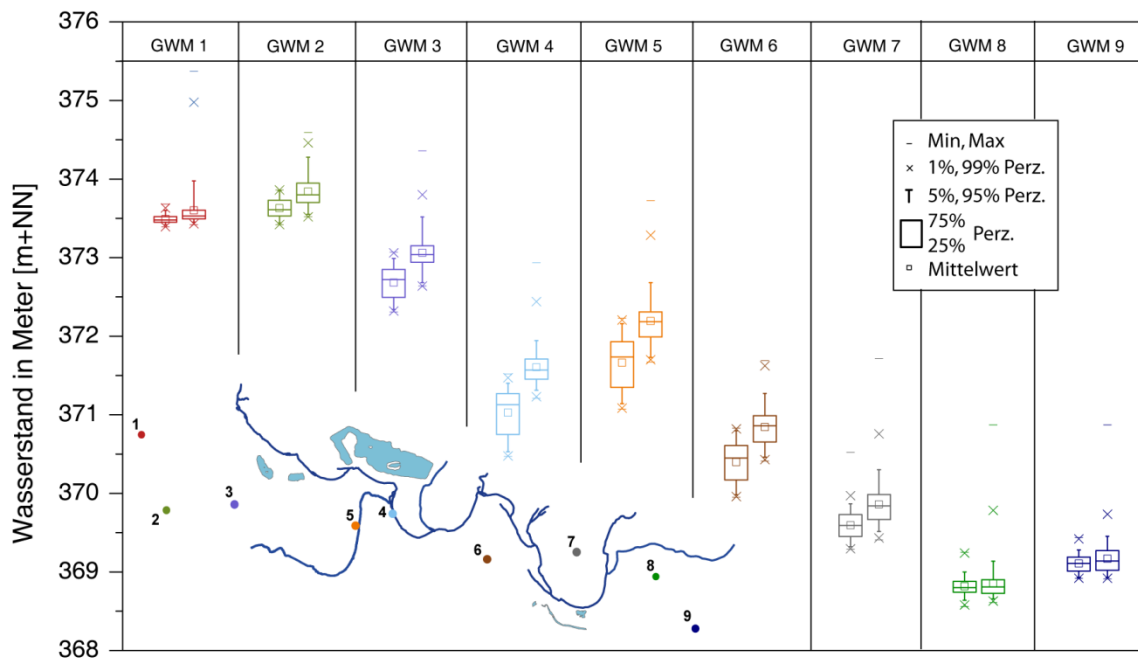


Abb. 4-10: Grundwassermessstellen (GWM 1 bis GWM 9) im Projektgebiet. Lage (unten links) und Veränderung, dargestellt in Boxplotdiagrammen (Quelle: Daten WWA Ingolstadt). Box links: 01.08.2007 bis 09.06.2010 (vor Maßnahmenbeginn), Box rechts: 09.06.2010 bis 01.08.2013 (nach Maßnahmenbeginn) (FISCHER & CYFFKA 2014, S.174).

4.1.4 Klima

Mit einer Jahresmitteltemperatur von 8,8°C (1981-2010, Klimastation Neuburg; DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD o. J.)) bzw. 8,7°C (1990-2012, Klimastation Karlshuld; BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL 2014)) und den warmen, trockenen Sommern besitzt der Donauraum bei Neuburg ein gemäßigt subkontinentales Klima. Der Betrieb der Messstation in Karlshuld (Lfl) wurde am 24.07.2013 leider eingestellt, wodurch Daten für eine Auswertung nur vom 06.12.1989 bis zum 23.07.2013 vorliegen (vgl. Abb. 4-11). Die vom Schloss Grünau aus nächstgelegenen Klima- und Niederschlagsstationen mit öffentlich zugänglichen Daten sind der Tabelle 4-4 zu entnehmen. Die Niederschlagsstation in Nassenfels liegt allerdings schon nördlich der Donau. Auf der Südseite sind die beiden Stationen Ingolstadt (Stadtklima) und die Station in Edelhausen vorhanden (LFL 2014, LFU-GKD 2015).

Tab. 4-4: Klimastationen in der Umgebung

Bezeichnung/ Ort	Entfernung vom Schloss Grünau in km	Höhe müNN	Niederschlag (1), Temperatur (2)	verfügbarer Zeitraum, (Niederschlag) ab:	Betreiber
Neuburg	4,9	380	2	(nur langj. Mittel)	DWD
Karlshuld	6,5	377	1,2	06.12.1989	Lfl
Karlshuld	6,5	374	1,2	(nur langj. Mittel)	DWD

Nassenfels	8,0	401	1	01.01.1961	DWD
Ingolstadt	11,8	360	1,2	02.01.1961	LfU
Edelhausen	14,6	400	1,2	23.07.2006	LfL
Karlskron	14,8	370	1,2	01.01.2008	privat

Die niedrigsten Monatsmitteltemperaturen mit $-0,8^{\circ}\text{C}$ treten im Januar und Februar ($0,1^{\circ}\text{C}$), die höchsten mit $18,5^{\circ}\text{C}$ im Juli auf (langjährige Mittelwerte Station Neuburg, Referenzperiode 1981-2010, (DWD o. J.)). Die durchschnittlichen Jahresniederschlagsmengen liegen bei 744 mm (1981-2010, Niederschlagsstation Nassenfels (DWD o. J. über LFU-GKD 2015) bzw. 686 mm (1990-2012, Klimastation Karlshuld LfL). Für die letzten fünf Jahre 2010-2014 wurden an der Station in Nassenfels jeweils 811 mm, 678 mm, 646 mm, 710 mm und 608 mm gemessen (DWD o. J. über LFU-GKD 2015). Dabei können die Niederschläge in der Region zwischen 477 mm (1969) und 999 mm (1981) beträchtlich schwanken.

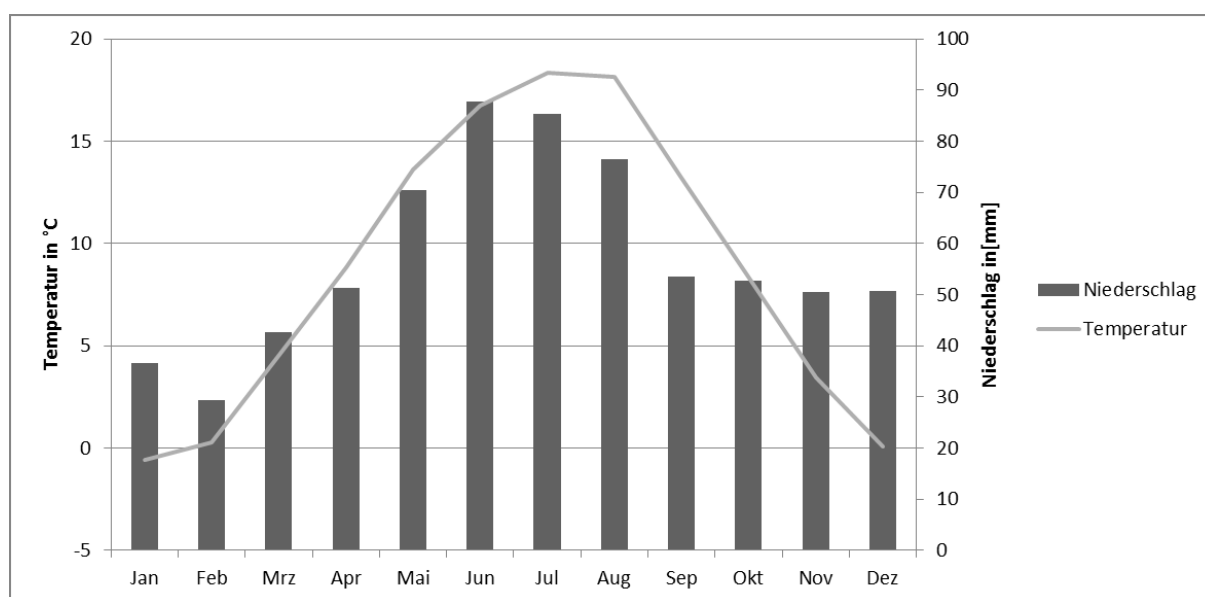


Abb. 4-11: Mittlerer Temperatur- und Niederschlagsverlauf für die Klimastation Karlshuld über den Zeitraum 1990-2013 (Daten LfL 2014).

Im langjährigen Mittel wie auch in den letzten fünf Jahren liegen die Sommerniederschläge mit 672 mm etwas über dem Niederschlag im Winterhalbjahr (521 mm), manchmal nur geringfügig wie 2012 (Sommer: 325 mm/Winter: 320 mm) oder deutlich wie in 2014 (Sommer: 418 mm/Winter: 190 mm). Im Mittel liegen 239 Tage (Tagesmittelwert) pro Jahr über 5°C (= Vegetationsperiode) mit durchschnittlich 1447 Sonnenstunden. Im Herbst und Winter tritt vermehrt Nebel auf. Die Ingolstädter Donauniederung gehört zu den wärmsten und trockensten Gebieten Südbayerns.

4.1.5 Vegetation und Landnutzung

Neben den von SCHERLE (1999) als „Trittbrettfahrer“ bezeichneten Nutzungen, die im Zuge des Gewässerausbaus entstanden sind, wie das im Auwald gelegene Industriegebiet Neuburgs, hat sich im Schutze der jahrhundertelangen Jagdtradition des Hauses Wittelsbach der Auwald erhalten. Die forstwirtschaftliche Nutzung erstreckt sich auf das ganze PG, nur sehr flachgründige trockene oder sehr nasse Standorte werden nicht genutzt. 54 % werden der Altersklasse II (21-40-jähriger Bestand) zugeordnet (vgl. WAF 1998 in MARGRAF 2004). Zur Baumartenzusammensetzung und Ausführungen zur historischen Landnutzung siehe auch MARGRAF (2004). Die Vegetationszusammensetzung wurde von MARGRAF (2004) vor den Dynamisierungsmaßnahmen erfasst. Zahlreiche Lebensraumtypen von Wasservegetation über Röhricht bis hin zu Hartholzauen konnten sich aufgrund der von nass bis sehr trocken reichenden Standorte ausbilden. Wechselwasserfluren und Weichholzauen waren auch aufgrund des Auenreliefs nur sehr kleinräumig vorhanden. Unter den 536 Pflanzenarten konnten von MARGRAF (2004) 80 Rote-Liste-Arten aufgenommen werden. Die Hartholzaue mit verschiedenen Ausprägungen eines Eichen-Ulmen-Eschen-Auwaldes war bestandsprägend.

Durch die Störung der hydrologischen Verhältnisse im Zuge des Staustufenbaus setzte ein Veränderungsprozess ein. Die Artenzusammensetzung entwickelte sich standortabhängig zu dauerfeuchten Erlenbruchwäldern oder zu einer trockenen Ausprägung der Hartholzaue (*Quercu-Ulmetum*) (MARGRAF 2004, LANG et al. 2011). Besonders betroffen zeigten sich die von wechselnden Wasserständen abhängigen Lebensräume, wie die auentypischen Weichholzauen. Sie reagierten mit einer schnellen Alterung und einer fehlenden Verjüngung. Wasserwechselzonen und Röhrichte verschwanden fast vollständig (MARGRAF 2004, CYFFKA et al. 2008). Abschließend bleibt festzustellen, dass der zwar flächenmäßig zu den größten noch erhaltenen Auwäldern Deutschlands zählende Auwald an der Donau zwischen Neuburg und Ingolstadt bezüglich der Habitatvielfalt und -qualität weit entfernt von einer intakten Aue ist (DISTER 1997, MARGRAF 2004).

Neben der bereits angesprochenen forstwirtschaftlichen Nutzung im PG sind die Jagd und die Angelfischerei an den Gewässern nennen. Aus naturschutzfachlichen Gründen werden die „Brennen“ durch eine einschürige Pflegemahd gepflegt.

4.1.6 Besitzverhältnisse und Schutzstatus

Der Großteil (etwa 90 %) des PG sind im Besitz des Wittelsbacher Ausgleichfonds. Die restlichen Flächen verteilen sich auf die Waldgenossenschaft Bergheim (westlich der Staatsstraße 2043), die Bayerischen Staatsforsten und einen kleinen Privatbesitz.

Die Donau ist wie alle FG ein öffentliches Gut. Seit dem Konzessionsvertrag (1921) ist die Ausnutzung der Wasserkraft für die Rhein-Main-Donau AG bis 2050 geregelt, der auch der Gewässerunterhalt obliegt (RMD 1967). Nach der Privatisierung wurde der Betrieb der Kraftwerke und damit auch die Betriebsführung der Staustufenkette Bertoldsheim-Vohburg

an die E.ON Kraftwerke GmbH bzw. E.ON Wasserkraft GmbH übertragen. Die Unterhaltspflicht der baulichen Anlagen, die im Zusammenhang mit der Renaturierung entstanden sind, unterliegt dem Freistaat Bayern und damit dem WWA Ingolstadt. Fischereirechte teilen sich verschiedene Vereine (GELHAUS & FISCHER in press).

Das PG bzw. der Ingolstädter Teil (Stanglettenschütt) ist seit 1983 als Landschaftsschutzgebiet ausgewiesen und daneben als FFH (Flora-Fauna-Habitat)- und als SPA (Special-Protected-Areas)- Gebiet als Bestandteil des europäischen Biotop-Verbundsystems NATURA 2000 an die EU gemeldet (HERRMANN et al. 2004B). Die naturnahen Auenbereiche (ca. 90 % des PG) mit Auwäldern, Gewässern, Röhrichtbereichen, Brennen etc. sind als „Amtliche Biotope“ (§ 30 BNatSchG und Art 23 BayNatSchG) eingestuft und beinhalten zehn FFH-Lebensraumtypen.

4.2 Dynamisierungsmaßnahmen

4.2.1 Maßnahmen zur Dynamisierung und ihre Steuerung

Etwa sechs Jahre nach Beendigung der Planungsphase und 14 Jahre nach der Machbarkeitsstudie (DISTER 1997) waren 2011 sämtliche Umsetzungs- und Baumaßnahmen für die Dynamisierung, bestehend aus drei Maßnahmen (Umgebungsbach, Ökologische Flutung und Grundwasserabsenkung), abgeschlossen. Die Kombination der drei Maßnahmen zielt darauf ab, in einem staugeregelten Abschnitt der Donau auentypischen Bedingungen herzustellen.

4.2.1.1. Umgebungsgewässer

Im Oberwasser der Staustufe Bergheim wurde auf der rechten Seite zwischen Flkm. 2470 und 2471 ein Ausleitungsbauwerk (Abb. 4-12) mit integriertem Fischpass errichtet. Durch dieses Bauwerk wird ein neuer Aubach, der Ottheinrichbach, ausgeleitet, der auch als Umgebungsgewässer (UG_{Gew}) für die Staustufe Bergheim dient.



Abb. 4-12: Ausleitungsbauwerk und erster Abschnitt des Ottheinrichbaches. Links: Ausleitungsbauwerk mit Fischpass (Foto: Peter Fischer, 2015). Rechts: Kurze Anbindung zum stark getrübbten Längenmühlbach und „Trogbrücke“. Im Hintergrund der Beckenpass (noch ohne Wasser) und die obere Flutmulde (Foto: Peter Fischer, 2010).

Der OHB hat eine Lauflänge von 8,4 km und stellt einen neuen Fließgewässerlebensraum innerhalb der Aue dar. Der Durchfluss des Ottheinrichbaches ist steuerbar und soll nach Planfeststellungsbeschluss zwischen 2,5 und 5 m³/s schwanken (SCHLEGEL 2004), über die Betriebsvorschrift der Bauwerke wird 0,5 m³/s als unterste Grenze geregelt. Bis zum November 2012 war der Abfluss des OHB demnach auf 0,5 bis 5 m³/s begrenzt und wird seitdem, abhängig vom Donauabfluss, in Schritten von 0,5 m³/s gesteuert (Tab. 4-5). Von der Ausleitungsmenge müssen etwa 0,5 m³/s Wasservolumen abgezogen werden, will man den Abfluss des OHB bestimmen, da diese Menge kurz vor der „Trogbrücke“ über den Fischpass zum LMB fließt (Abb. 4-2). Ausleitungsmengen unter 1,0 m³/s wurden bisher nur zweimal, Ausleitungsmengen unter 1,5 m³/s nur selten im Untersuchungszeitraum erprobt (FISCHER 2014). Die neue Staffelung der Ausleitungsmengen ermöglicht eine Reduzierung auf 1,5 m³/s bei < 200 m³/s Abfluss in der Donau. Bisherige Ergebnisse (siehe Kapitel 6.1, vgl. FISCHER und CYFFKA (in press)) würden auch eine weitere, im Folgenden als optimierte Steuerung bezeichnete Dotierung der Ausleitungsmengen auf unter 1,5 m³/s erlauben, ohne die benetzte Wasserfläche über das FG zu unterbrechen (weitere Ausführungen siehe Kapitel 6.1.2).

Tab. 4-5: Steuerung in Abhängigkeit des Donauabflusses am Pegel Bergheim; OHB = Ottheinrichbach, ÖF = Ökologische Flutung; GWA = Grundwasserabsenkung.

Donauabfluss in m ³ /s am Pegel Neuburg	Maßnahme	Ausleitungsmenge in m ³ /s bis zum 05.11.12	Ausleitungsmenge in m ³ /s seit dem 05.11.12	Ausleitungsmenge in m ³ /s (optimiert)
< 100	Ausleitung OHB	0,5	1,5	< 1,0
100-150	Ausleitung OHB	2,5	1,5	1,0
150-200	Ausleitung OHB	2,5	1,5	1,0
200-250	Ausleitung OHB	2,5	2,0	1,5
250-300	Ausleitung OHB	2,5	2,5	2,5
300-350	Ausleitung OHB	3,5	3,0	3,0
350-400	Ausleitung OHB	3,5	3,5	3,5
400-450	Ausleitung OHB	4,5	4,0	4,0
450-500	Ausleitung OHB	4,5	4,5	4,5
> 500	Ausleitung OHB	5,0	5,0	5,5
600 – 1.000	Ausleitung OHB & ÖF	bis 25 m ³ /s (ÖF) + 5 m ³ /s (OHB)	bis 25 m ³ /s (ÖF) + 5 m ³ /s (OHB)	bis 25 m ³ /s (ÖF) + 5,5 m ³ /s (OHB)
< 150	Ausleitung OHB & Start GWA	1,5 m ³ /s (OHB)	1,5 m ³ /s (OHB)	1,0 m ³ /s (OHB)
~180	Ausleitung OHB & Ende GWA	1,5 m ³ /s (OHB)	1,5 m ³ /s (OHB)	1,0 m ³ /s (OHB)

Der Ottheinrichbach legt von der Ausleitung (Tosbecken, nach Ausleitungsbauwerk) bis zu seiner Mündung einen Höhenunterschied von 5,5 m (bezogen auf die Gewässersohle) zurück mit einem mittleren Gefälle von 0,07 %. Bis zur „1. Rückleitung“ sind es 5,4 m und aufgrund der deutlich kürzeren Fließstrecke 0,11 % Gefälle (eigene Vermessung 2015). Damit ergeben sich 6,8 m Höhendifferenz zwischen dem Wasserspiegel im Ausleitungsbauwerk des OHB (Oberwasser) und der Mündung. Während der OHB für diese Strecke (8,4 km) ein Gefälle von 0,08% aufweist, liegt das der Donau (inklusive Staustufe) bei 0,13 % für rund 5,1 km.

Das Umgehungsgewässer kann aufgrund der hydrologisch-morphologischen Bedingungen vor den Baumaßnahmen, der Intensität und Ausführung der baulichen Tätigkeiten und der dort wirkenden Dynamisierungsmaßnahmen in fünf Abschnitte unterteilt werden, die sich noch in weitere Teilabschnitte (Teilstrecken) untergliedern lassen (Abb. 4-13). Eine Übersicht und Verortung der im Folgenden verwendeten lokalen Begriffe kann der Abbildung 4-17 in Verbindung mit Tabelle 4-6 entnommen werden. Die Beschreibung bezieht sich auf den Prärenaturierungs- und Postbaurbeitenzustand.

- Der **erste** etwas über 2 km lange **Abschnitt**, im folgenden Text auch als „Neubaustrecke“ bezeichnet, ist der Fließgewässerabschnitt, in dem die meisten Untersuchungen und Messungen durchgeführt wurden. Wegen der unterschiedlichen hydrologisch-morphologischen Verhältnisse wird er für diese Arbeit in fünf Teilabschnitte untergliedert.
 - **Teilabschnitt (1.1):** Direkt nach dem Ausleitungsbauwerk, inkl. Fischpass und dem Tosbecken verläuft der OHB ca. 160 m in einem naturnah gestalteten leicht gewundenen, aber mit Wasserbausteinen fixierten Flussbett. Am Ende fließen die ca. 300-500 l Dotationsmenge des ersten Vertical-Slot Passes über einen zweiten Fischpass dem Längenmühlbach zu und erlauben eine kurze Anbindung an die Donau. Im ersten Abschnitt fließt bereits seit 2008 Wasser.
 - **Teilabschnitt (1.2):** Danach überwindet der neu geschaffene Aubach mittels einer „Trogrücke“ (siehe Abb. 4-15, rechts) den Längenmühlbach. Diese „Flusskreuzung“ wurde errichtet, um zu verhindern, dass der Ottheinrichbach über den Längenmühlbach sofort in das Unterwasser der Staustufe entwässert und das ausgeleitete Wasser den Auenwald gar nicht erreicht. Dieser kurze, nur 88 m lange Abschnitt, kann aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten und dem Gefälle von 1,7 % als „Gebirgsbach“ bezeichnet werden. Nach elf Wochen wurde dieser Bereich aufgrund zu hoher Fließgeschwindigkeiten in einen aufgelassenen Beckenpass mit Steinriegeln umgestaltet (Abb. 4-18).
 - **Teilabschnitt (1.3):** Unterhalb dieses für Auen untypischen Flussabschnittes wurden eine bestehende Flutrinne, sowie eine alte Flussschlinge zum neuen Gewässerbett umgestaltet. Hier war vor Beginn der Baumaßnahmen kein Fließgewässer vorhanden, weshalb hier die meisten baulichen Maßnahmen vorgenommen werden mussten. Das Gerinne wurde bis zu 3 m tief in das bestehende Gelände eingegraben, um das notwendige Gefälle herzustellen.

Bis zur „Wegekreuzung“ wurde ein komplett neues Gerinne mit naturnahen Prall- und Gleithängen modelliert, zwei große Kiesinseln angelegt, Totholz eingebracht sowie kleine Kiesdepots im Gerinnebett angelegt, um die eigendynamische Entwicklung zu initiieren.

- **Teilabschnitt (1.4):** Im letzten Abschnitt von der „Wegekreuzung“ bis zum „Wetterloch“ nimmt der Kiesanteil im Gerinne deutlich ab und geht, nach einer von Sanden dominierten Fließstrecke, in feinere Sedimente und schließlich in Auenlehm über. Auch hier wurden vereinzelt Totholzwurzeln eingebracht und zwei Inseln erhöhen die Strukturvielfalt dieses Abschnitts. Prallhänge wurden aufgrund des gestreckten Verlaufs nur verhalten angelegt.
- **Teilabschnitt (1.5):** Das „Wetterloch“ selbst, ein durch Erosion entstandener Tümpel, wurde im Zuge der Baumaßnahmen mit einer dort endenden Flutrinne derart angeschlossen, dass ein natürlicher Geländesprung entfernt wurde, um die Durchgängigkeit herzustellen (Abb. 4-22). Daraus entstand eine 2 m breite Engstelle (etwa Baggerschaufelbreite) mit senkrechten Uferwänden, die in dieser Form nicht lange Bestand hatte.
- Im **zweiten Abschnitt** (900m), nach der Biegung am „Wetterloch“, waren ehemals bereits periodische Auengewässer vorhanden (Abb. 4-13).
 - Diese wurden durch den Rückstau des Zeller Kanals (ZK) (bei höheren Wasserständen) mit Wasser versorgt und unterlagen, dem Abflussregime des ZK entsprechend, jahreszeitlich starken Wasserstandsschwankungen. Auch hier wurde die Gewässersohle noch an einigen Stellen an die Geländehöhe angepasst und an einer Stelle Weidenfaschinen zur Optimierung der Gewässerbreite und der Linienführung eingesetzt. Der Ottheinrichbach wird in diesem Bereich von feinmaterialreichen Ufern begleitet.
- Im **dritten Abschnitt** durchströmt das neue Fließgewässer eine 1,6 km lange ehemalige Flussschlinge, die zuvor nur vom ZK mit entsprechend geringem Abfluss durchflossen wurde. Bauliche Maßnahmen fanden mit Ausnahme einer neugeschaffenen Anbindung an die Donau nicht statt. Sie ist temporär, hat nach den Planungsunterlagen ein relativ hohes Gefälle von ca. 0,10 % (SCHLEGEL 2004) und wird nur bei einer ÖF oder einem natürlichen Hochwasser mit Wasser durchströmt. In diesen Zeiten ist der OHB an die Donau angebunden.
- Im **vierten Abschnitt** teilt sich der OHB auf:
 - **Teilabschnitt (4.1):** Ein Teil, etwas mehr als die Hälfte der Wassermenge nach SCHLEGEL (2004) 1,5 bis 2,9 m³/s), fließt über eine zweite Anbindung, die sogenannte „1. Rückleitung“, bis zur Donau. Dieser ca. 300 m lange Gewässerabschnitt mit einem Gefälle von 0,4 % (SCHLEGEL 2004) wurde komplett neu angelegt und steht deshalb auch im Fokus der Untersuchungen. Auf den letzten 40 Metern steigt das Gefälle nochmal auf etwa 1,5 % an.
 - **Teilabschnitt (4.2):** Der Rest (1,1 bis 2,0 m³/s vgl. SCHLEGEL 2004) der Wassermenge durchfließt zunächst ein etwa 1,6 km langes Stück, das ehemals durch temporäre Gewässer, je nach Grundwasserstand und Wasserführung des Zeller Kanals, geprägt war. Seit der Ausleitung ist ein permanentes Gewässer entstanden. Hier greift die Maßnahme der Grundwasserabsenkung.

- Im **fünften Abschnitt** von der „Biberbrücke“ (Bauwerk 7, Abb. 4-17) zur Mündung (inkl. Drainagegraben) strömt der restliche OHB die letzten ca. 2 km durch einen wiederangebundenen, großen Altarm, die „Alte Donau“ (ehemals ein einseitig angebundener Flussmäander).
 - **Teilabschnitt (5.1):** Nach einer kurzen Strecke mit relativ geringen Breiten und zwei oberflächlich angeschlossenen, längeren Rückstaubereichen geht der OHB in die „Alte Donau“ über. Hier besitzt der OHB den Charakter eines stehenden Gewässers mit größeren Gewässerbreiten und teilweise auch -tiefen.
 - **Teilabschnitt (5.2):** Nach der „Alten Donau“ mündet der OHB in einer ebenfalls neugestalteten, ca. 400 m langen Fließstrecke in die Donau (SCHLEGEL 2004). Der Mündungsbereich wurde neu gestaltet, die bisher vorhandene Rückschlagklappe entfernt und das Bachbett verbreitert. Im Mündungsbereich des OHB wird dessen Strömungsverhalten durch Schwellbetrieb der Staustufe Ingolstadt beeinflusst. Dadurch wechselt der OHB die Fließrichtung innerhalb eines Tages mehrmals entweder zur Donau hin (die natürliche Richtung) oder, von der Donau weg, in den Altarm hinein.
- Im **sechsten Abschnitt** zweigt ein weiterer, als Drainagegraben bezeichneter Abschnitt, von der „Alten Donau“ ab. Dieses, als Entwässerungsgraben angelegte Gerinne von rund 2,1 km, soll im Rahmen der Grundwasserabsenkung (GWA) das anstehende Wasser im Bereich um die „Alte Donau“ zur Alten Ach bzw. Aich ableiten. Für die Umsetzung der GWA wurde ein Ausleitungsbauwerk (Abb. 4-17) zum Ablassen des Wassers aus der „Alten Donau“ errichtet. Der Drainagegraben führt aktuell nur während einer ÖF durchgehend Wasser bis zum Sielbauwerk. Auch hier kommt es zu erosiven Prozessen (GRAUVOGEL 2014), die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

In den gesamten neu gebauten Strecken des Umgehungsgewässers ist die Sohle stellenweise mit Einzelblöcken, Kiesdepots und Totholzelementen, wie Wurzelstöcken und Baumstämmen strukturiert worden, um die Ausbildung verschiedener Kleinhabitate zu begünstigen. Ebenso wurden, wie bereits erwähnt, Prall- und Gleithänge modelliert, sowie tiefere Stellen (Pools) im Gerinnebett ausgehoben oder Inseln gebaut. Diese naturnahe Ausgestaltung mit wechselseitigen Böschungsneigungen von 1:2 bis 1:4 (SCHLEGEL 2004) entsprechen den typischen Neigungen bei der Anlage von Trapezgerinnen (LFW 2005, DWA 2014).

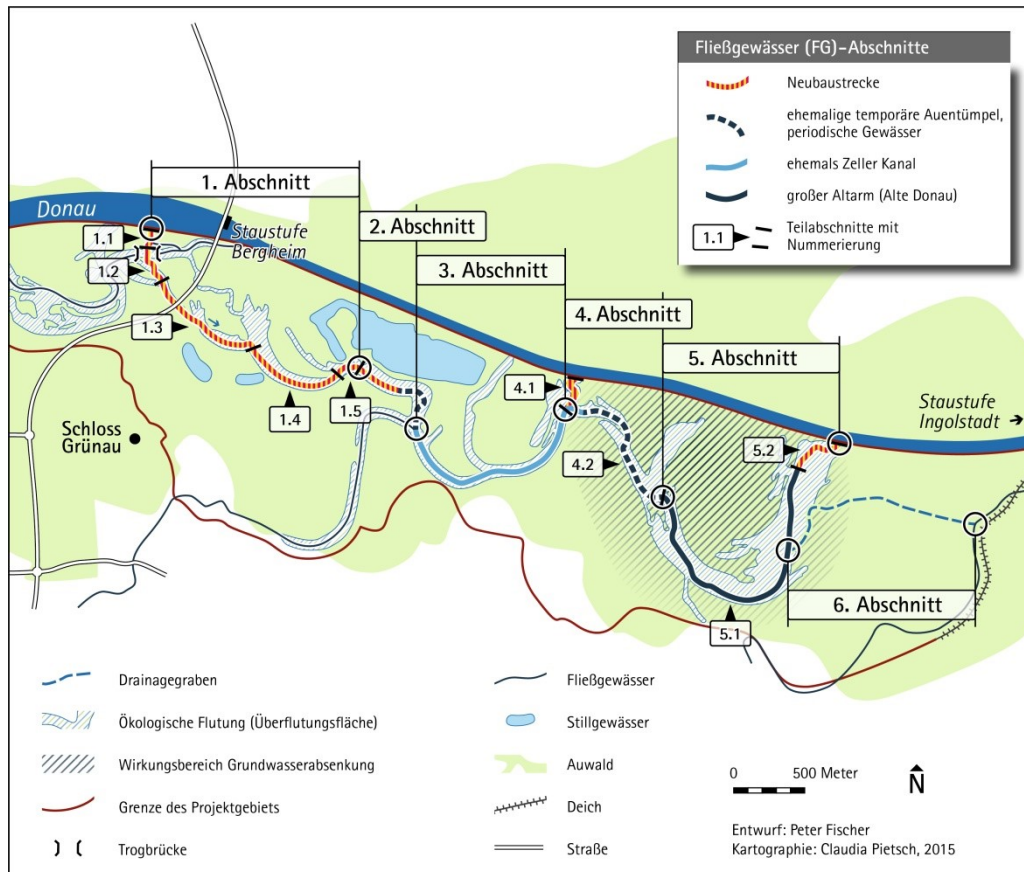


Abb. 4-13: Einteilung des Ottheinrichbaches in seine sechs Abschnitte und Teilabschnitte, vorgenommen im Hinblick auf die natürlichen Bedingungen vor Baubeginn und die baulichen Maßnahmen. Gelb-rot = starke Bautätigkeiten, kein Gewässer vor Dynamisierung; Dunkelblau gestrichelt = bereits vorher ehemalige temporäre Auengewässer, stellenweise kleinere laufkorrigierende Baueingriffe; Hellblau = ehemals Zeller Kanal; Dunkelblau = ehemals einseitig angebundener Altarm mit Stillgewässercharakter „Alte Donau“.

4.2.1.2. Ökologische Flutung

Seit der Inbetriebnahme der Staustufe Bergheim (1970) wurde der Auwald südlich der Donau nur mehr ab einem ca. 3-jährlichen Ereignis ($> 1.250\text{m}^3/\text{s}$) über ein Streichwehr oberhalb der Staustufe bei Flusskilometer 2.472,6 geflutet (Abb. 4-14). Eine der Dynamisierungsmaßnahmen ist die sogenannte Ökologische Flutung, mit der auch kleine bis mittlere Hochwasserereignisse den Auwald wieder mit Wasser versorgen sollen. Dazu wurde im Bereich des vorhandenen 100 m langen Streichwehrs ein weiteres Ausleitungsbauwerk (Abb. 4-14) errichtet. Unter einem natürlichen Hochwasser wird dagegen das weitgehend ungesteuerte Überfließen des Streichwehres bzw. auch ein entsprechend hoher Durchfluss in der Donau (Rückstauprozesse) bezeichnet der ohne weiteren menschlichen Eingriff erfolgt.



Abb. 4-14: Ausleitungsbauwerk für Ökologische Flutungen. Links: mit dem ca. 100 m langen (aktiven) Streichwehr und überströmten Schütztafeln während des Juni-Hochwassers (Foto: Peter Fischer, 2013). Rechts: mit geschlossenen Schütztafeln und Einbauten im Tosbecken (Foto: Peter Fischer, 2015).

Ab einem Donauabfluss von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 4-4), wenn also die volle Auslastung der Staustufenturbinen um etwa $50 \text{ m}^3/\text{s}$ überschritten ist, erlaubt es das Planfeststellungsverfahren, hier bis zu $25 \text{ m}^3/\text{s}$ Donauwasser auszuleiten. Gleichzeitig wird dann der OHB mit $5 \text{ m}^3/\text{s}$ Donauwasser beschickt, so dass insgesamt $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgeleitet werden.

Abflüsse von über $600 \text{ m}^3/\text{s}$ - $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Donau (= Voraussetzung für ÖF) treten statistisch gesehen 2 bis 3-mal pro Jahr für wenige Tage (6,5 Tage) auf. Bei Hochwasserereignissen ab $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ werden die Schütztafeln am Wehr wieder geschlossen, damit genug Retentionsraum für eventuell anlaufende Hochwasserwellen zur Verfügung steht. Nach SCHLEGEL (2000D) können bis zu 11 Mio. m^3 Wasser zurückgehalten werden. Ab ca. $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$ läuft das Wasser ungehindert über das große Streichwehr und es kommt wie früher zu einer natürlichen Flutung des Auwaldes.

Bei einer ÖF wird zuerst das Drosselbauwerk unterhalb der Staustufe Bergheim geschlossen (Abb. 4-15), um den Längenmühlbach aufzustauen. Als nächstes erfolgt die Öffnung des Ausleitungsbauwerks für die ÖF, woraufhin bis zu $25 \text{ m}^3/\text{s}$ Donauwasser zunächst in den LMB fließen. Nach dem Auffüllen und Überfluten des westlichen Bereiches tritt an zwei Stellen, westlich und östlich der „Trogbrücke“, Wasser über das Ufer und strömt dem Auwald zu (Abb. 4-15, rechts und Abb. 4-17). Über die obere Furt und Flutmulde (Lagebeschreibung in Fließrichtung des LMB und Geländehöhe) erreicht es auf einem kurzen (ca. 120 m) und rund 25 m breiten Abschnitt den OHB. Oder über die untere Furt (Abb. 4-17), rund 200 m oberhalb des Drosselbauwerks, und eine so angeschlossene Flutrinne, die durch den Auwald verläuft, erreicht das Wasser über den langen Weg erst nach ca. 800 m den OHB.

Der größte Teil der für die ÖF ausgeleiteten Wassermenge (maximal ca. $20 \text{ m}^3/\text{s}$, durch Wasserverlust im westlichen Bereich) fließt nach dem Passieren der oberen Flutmulde weiter Richtung Osten im Gewässerbett des OHB. Der geringere Anteil ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) wird über einen Durchlass (D 3) (Abb. 4-17, Tab. 4-6) unterhalb der Staatsstraße St 2043 (bauliche Begrenzung der maximalen Ausleitungsmenge) durch den Auwald geleitet. Beide Fließwege finden an der Wegekreuzung wieder zusammen.

Um bei einer ÖF ein längeres Aufstauen des Wassers in der Aue zu vermeiden (so der Planungsstand), wurde westlich der „1. Rückleitung“ etwa bei Flkm. 2.467,7 eine weitere Anbindung („temporäre Rückleitung ÖF“) geschaffen (Abb. 4-2). Damit fließt das Wasser bei einer ÖF nach zwei Ausleitungen über drei Wege wieder in die Donau zurück. Sobald der Donauabfluss unterhalb 600 m³/s fällt, wird das Ausleitungswehr wieder geschlossen. Im Idealfall wird mit dem Öffnen des Drosselbauwerks solange gewartet, bis der Längesmühlbach nicht mehr über die untere Flutmulde entwässern kann. Spätestens wenn der Wasserstand im LMB wieder dem Abfluss vor der ÖF entspricht, ist die ÖF endgültig beendet.



Abb. 4-15 Drosselbauwerk und aufgestauter Längesmühlbach. Links: Drosselbauwerk (offen) (Foto: Peter Fischer, 2013). Rechts: aufgestauter Bereich um die Trgbrücke im Oberwasser des Längesmühlbaches (Luftbild aus UAV-Befliegung: Peter Fischer, 2012).

4.2.1.3. Grundwasserabsenkung

Die Grundwasserabsenkung (GWA) zielt darauf ab, die Grundwasserstände zu dynamisieren. Besonders im östlichen PG, in dem der Rückstau der Staustufe Ingolstadt wirkt, wodurch meist hohe eher stationäre Grundwasserstände vorliegen, soll diese Maßnahme eine Absenkung ermöglichen (vgl. Abb. 4-9). Bei der Dynamisierung von Auen geht es nicht nur um ein „Mehr an Wasser“ in der Aue. Vor allem an staugeregelten Flüssen sind im Oberwasser besonders auch Niedrigwasserphasen wichtig. Die in der Natur üblichen Trockenphasen im Auenbereich, überwiegend im Herbst, können durch die GWA nachgeahmt oder wieder verstärkt werden. Zusätzlich soll damit auch die Entstehung von Wasserwechselzonen im Bereich der „Alten Donau“ begünstigt werden.

Zu Niedrigwasserzeiten der Donau (meist im Spätsommer/Herbst, siehe Kapitel 4.1.4.1) wird das GW abgesenkt, indem einerseits der Zufluss vom OHB unterbunden und andererseits das bestehende Wasser teilweise aus diesem Gebiet ausgeleitet wird. Für die Umsetzung der GWA wurde neben den beiden Absperrbauwerken (Nr. 1 und Nr. 2, siehe Abb. 4-17) ein Ausleitungsbauwerk (Abb. 4-16, links) zum Ablassen des Wassers aus der „Alten Donau“

errichtet sowie ein ca. 2,1 km langer Drainagegraben (SCHLEGEL 2004) bis zur Alten Ach angelegt.



Abb. 4-16: Bauwerke für die Grundwasserabsenkung. Links: Ausleitungsbauwerk bei der „Alten Donau“. Rechts: Einsetzen der Dammbalken durch Mitarbeiter des WWA Ingolstadt in das 1. Absperrbauwerk (Fotos: Peter Fischer, 2011).

Die Grundwasserabsenkung wird eingeleitet, sobald der Donauabfluss unter $150 \text{ m}^3/\text{s}$ fällt, und erst wieder beendet, wenn der Abfluss der Donau über $180 \text{ m}^3/\text{s}$ steigt (Tab. 4-4). Dazu wird das 1. Absperrbauwerk (Abb. 4-16, rechts) geschlossen, indem Dammbalken eingezogen werden. Jetzt kann der Ottheinrichbach nur noch über die 1. Rückleitung in die Donau entwässern. Nur ein minimaler fließgewässerökologisch bedingter Restabfluss (derzeit ca. 100 l/s , vgl. STOCKER 2014) fließt weiter zum fünften Abschnitt des OHB (Abb. 4-13). Das 2. Absperrbauwerk an der Mündung des OHB wird ebenfalls geschlossen (Abb. 4-17), um ein Einströmen von Wasser – insbesondere während des Schwellbetriebs – zu unterbinden. Gleichzeitig wird im Bereich der „Alten Donau“ das Bauwerk zum Drainagegraben (Abb. 4-17) geöffnet, um den Wasserspiegel der „Alten Donau“ abzusenken. Das ausgeleitete Wasser versickert nach kurzer Fließstrecke im Verlauf des Drainagegrabens (Abb. 4-16, links).

4.2.2 Projektspezifische Details

Umsetzung und Kosten

Die Bauzeit für das Dynamisierungsprojekt betrug fünf Jahre. Am 29. Juni 2010 wurde der Umgehungsbach feierlich eröffnet. Die Kosten für die Bauwerke und Maßnahmen, die für die Ökologischen Flutungen und das Umgebungsgewässer notwendig waren, betragen ca. 14 Mio €. Geldgeber und eine detaillierte Kostenaufstellung finden sich bei GELHAUS und FISCHER (in press).

Betriebsvorschrift

Zweck der Betriebsvorschrift ist die Regelung der Steuerung für den Probebetrieb der Ausleitungsbauwerke, des Drosselbauwerks und die im Rahmen der Grundwasserabsenkung durchzuführenden Maßnahmen bis zum 31.12.2016. Bis zum 01.01.2017 soll eine neue Betriebsvorschrift die Steuerung regeln (WWA 2011). Zu dieser Arbeit auch

einen wesentlichen Beitrag leisten soll. Der Betrieb erfolgt durch die E.ON Wasserkraft GmbH auf Anweisung des WWA Ingolstadt. Entscheidend für die Durchführung der ÖF sind folgende Auflagen:

„Bei Beginn der Flutung wird durch das Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt sichergestellt, dass sich in diesem Bereich keine Personen befinden“ und die Auflage „Es muss sichergestellt sein, dass es bei ökologischen Flutungen zu keinen nachteiligen Veränderungen des Grundwasserspiegels im Bereich Gewerbegebiet Grünau kommt“ (WWA 2011, S. 3ff).

Für die Dotation des UG_{Gew} sind zwei Auflagen für die weitere Betrachtung relevant: *„Bei einer Wassermenge $<100\text{m}^3/\text{s}$ in der Donau werden $0,5\text{ m}^3/\text{s}$ ausgeleitet“* und weiter: *„Von der o.g. Aufteilung der Wassermenge kann [...] aus ökologischen Gründen abgewichen werden.“* Für die Grundwasserabsenkung ist vor allem der Start- und Endzeitpunkt wichtig: *„Die Steuerung der Bauwerke für das Niedrigwassermanagement [frühere Bezeichnung für die Grundwasserabsenkung, d. Verf.] erfolgt bei einem Wasserabfluss unter $150\text{ m}^3/\text{s}$ in der Donau“ (WWA 2011, S. 4).*

Jagd

Im Zuge der jahrhundertelangen Jagdtradition des Hauses Wittelsbach gibt es mehrmals im Jahr Jagdtermine: jedes Jahr im Sommer (Ende Juli bis Mitte August) und drei Treibjagdtermine im Herbst/Winter. Zu diesen Zeiten konnten keine Messungen und Aufnahmen durchgeführt werden, da ein Fahrverbot für den gesamten Auwald gilt. Desweiteren wurde jeweils der Abfluss des OHB auf $1,5\text{ m}^3/\text{s}$ reduziert.

Weitere Rahmenbedingungen und Auswirkungen auf das PG- und angrenzende Gebiete (Forstwirtschaft, Landwirtschaft und Freizeit- und Erholungsaktivitäten) werden von HERRMANN (2001) näher beschrieben.

4.3 Das Untersuchungsgebiet – Standorte

In der vorliegenden Arbeit stellt der zentrale Bereich des PG, der beschränkt ist auf die fließgewässernahen Bereiche, das eigentliche UG dar (siehe Abb. 4-2). Beginnend am Ausleitungsbauwerk des Ottheinrichbaches folgt es dem neuen Gewässerlauf, bis dieser im Bereich südlich des Albenschüttweihers mit den überstauten Bereichen eine zusammenhängende Wasserfläche bildet, die sich im Röhricht- und Schilfbestand verliert. Hier verlieren die Baumaßnahmen, die im Zuge des Dynamisierungsprojektes vorgenommen wurden an Bedeutung und die natürliche Reliefform der Altwasser dominiert (siehe Abb. 4-13, 4-17). Eine weitere näher betrachtete hochdynamische Fließgewässerstrecke befindet sich im Bereich der „1. Rückleitung“, die von der Nasenbrücke (B 5) bis zur Mündung in die Donau reicht (Abb. 4-17, Tab. 4-6). Zur leichteren Orientierung, und weil die Bauwerke insbesondere für die hydrologischen Verhältnisse eine große Rolle spielen, sind die wichtigsten in der Abbildung 4-17 verortet. Die Bezeichnungen der Brücken, Durchlässe und Furten sind der dazugehörigen Tabelle 4-6 zu entnehmen.

Bei den hydrologischen Prozessen, insbesondere bei der Betrachtung der horizontalen Ausbreitung des Wassers, umfasst das komplette UG donaunahe und donauferne sowie direkt im und am OHB gelegene und weiter entfernt liegende Bereiche. Bei den morphodynamischen Prozessen ist der Fokus vor allem auf die beiden bereits vorgestellten neu gebauten Abschnitte des Ottheinrichbaches gelegt („Neubaustrecke“ im 1. Abschnitt (Abb. 4-13) und an der „1. Rückleitung“). Innerhalb der Neubaustrecken können Zonen mit besonderer Morphodynamik abgegrenzt werden. Dort wurden unter anderem TLS-Messungen durchgeführt, die den Schwerpunkt der Arbeit bilden. Auf diese Standorte soll deshalb etwas näher eingegangen werden, um später die Ergebnisse vor dem Hintergrund ihrer Entstehungsgeschichte besser interpretieren zu können.

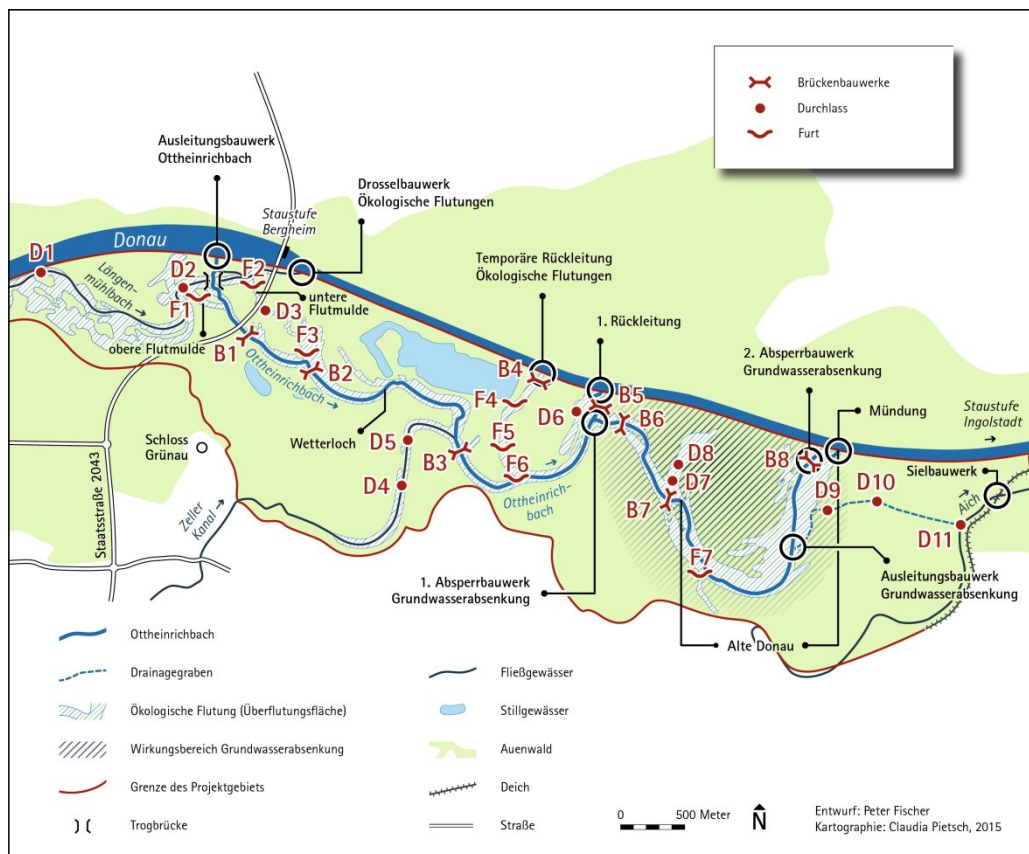


Abb. 4-17: Auswahl der hydrologisch und morphologisch relevanten Bauwerke im Untersuchungsgebiet (B = Brückenbauwerk, D = Durchlass, F = Furt). Die im Text verwendeten lokalen Bezeichnungen sind der Tabelle 4-5 zu entnehmen.

Tab. 4-6: Bauwerke mit lokalen Bezeichnungen im Untersuchungsgebiet (Auswahl), die Standorte sind der Abbildung 4-17 zu entnehmen.

Bauwerk					
Brückenbauwerk (Bezeichnung)	Nummer in Abb. 4-17	Durchlass (Bezeichnung)	Nummer in Abb. 4-17	Furt (Bezeichnung)	Nummer in Abb. 4-17
Trogbrücke	siehe Legende	k. A.	D 1	F. bei oberer Flutmulde	F 1

Radwegbrücke	B 1	Rechteckdurchlass LMB	D 2	F. bei unterer Flutmulde	F 2
Wegekreuzung	B 2	Staatsstraße	D 3	F. an der Wegekreuzung	F 3
Pionierbrücke	B 3	k.A.	D 4	Nördliche F.	F 4
k. A.	B 4	Rohrdurchlass (am ZK)	D 5	Südliche F.	F 5
Nasenbrücke	B 5	k. A.	D 6	k. A.	F 6
Inselbrücke	B 6	k. A.	D 7	k. A.	F 7
Biberbrücke	B 7	Rückstaubereich OHB	D 8		
Mündungsbrücke	B 8	k. A.	D 9		
		Drainagegraben	D 10		
		k. A.	D 11		

Standort „Trogbrücke“

Bereits in Kapitel 4.2.1.1 (Ausführung zu den Dynamisierungsmaßnahmen) wurde dieser Standort (der zweite Teilabschnitt des ersten Fließgewässerabschnittes (1.2), Abb. 4-13) kurz beschrieben und das hohe Gefälle herausgestellt. Nach der ersten Beobachtungsphase bis September 2010 wurden am rund 88 m langen Teilabschnitt wasserbauliche Nachbesserungen getätigt, um die hohen Fließgeschwindigkeiten zu verringern. Umbaumaßnahmen zur Verbreiterung und Ausbildung eines aufgelassenen Beckenpasses, mit Steinriegeln statt einzelnen Störsteinen, veränderten die Morphologie besonders in der ersten Hälfte gravierend (Abb. 4-18).



Abb. 4-18: Standort an der „Trogbrücke“. Links: vor den Umbaumaßnahmen (Foto: Peter Fischer, 2010); Rechts: kurz nach Ende der Umbaumaßnahmen (Foto: Aueninstitut, 2010).

Standort „Radwegbrücke Prallhang 1 und 2“

Kurz nach der „Radwegbrücke“ wurden zwei Prallhänge „vormodelliert“, die hier aufgrund der natürlichen Geländetopographie relativ große und steile Uferwände ausbilden. Die Gewässersohle liegt etwas über 3 m bzw. 4 m unterhalb der anschließenden Auenterrasse bzw. dem Niveau der Donauaue (Abb. 4-19). Der Aufbau ist Kies unter Auenlehm mit

einzelnen Sandlinsen (Sand-Schluff-Wechselfolgen) und zwischengeschalteten Schluff und/oder Tonschichten (Bodenansprache im Gelände). Dabei deuten die Sandeinlagerungen auf eine höhere Transportkraft und damit auf eine periodisch wiederkehrende Erhöhung der Fließgeschwindigkeit hin.



Abb. 4-19: Standort an der „Radwegbrücke“. Links: „Prallhang 1“ kurz nach den Bauarbeiten (Foto: Peter Fischer, 2010); Rechts: „Prallhang 2“ kurz nach den Bauarbeiten (Foto: Peter Fischer, 2010).

Standort „Wegekreuzung Sedimentzunge“

An der Brücke bei der „Wegekreuzung“ entwickelte sich im Laufe des Untersuchungszeitraumes eine Akkumulationsform in Gestalt einer Sedimentzunge. Diese schiebt sich sukzessive in Richtung Brückenbauwerk (Abb. 4-20).



Abb. 4-20: Standort an der „Wegekreuzung“. Links: Sedimentzunge kurz nach der ersten ÖF, rechts mit Blick in Fließrichtung (Fotos: Peter Fischer, 2011).

Standort „Prallhang am QP 17-20“

Zwischen „Wegekreuzung“ und „Wetterloch“ wurde ein weiterer Prallhang als Scanstandort ausgewählt. Dieser deutlich kleinere Prallhang ist gänzlich im Auenlehm ausgebildet. Es dominieren Schluffe und Feinsande (nach Bodenansprache im Gelände). Hier wurden zusätzlich vier Querprofile angelegt (Abb. 4-21).

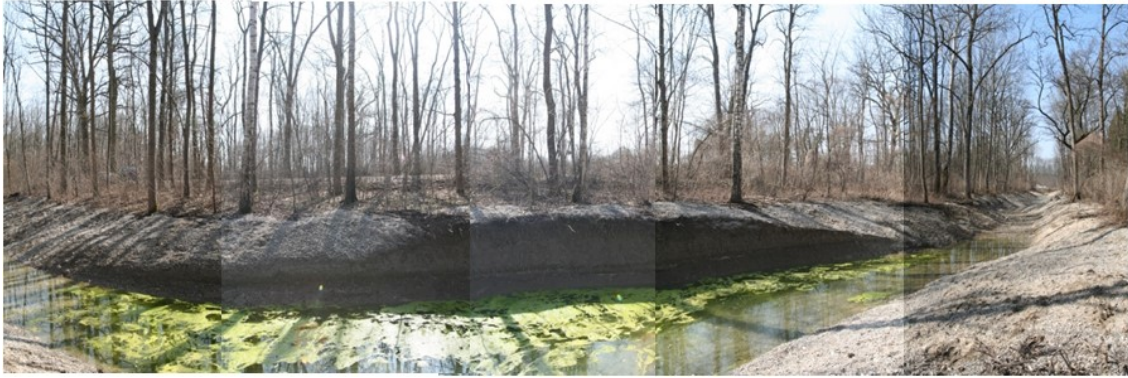


Abb. 4-21: Standort „Prallhang am Querprofil 17 bis 20“ (Foto zusammengesetzt aus TLS-Aufnahmen, Peter Fischer, 2010).

Standort „Wetterloch“

Das Wetterloch wurde bereits bei dem letzten großen Hochwasserereignis 1999 auf natürliche Weise angelegt und entwickelte sich 2002 und 2005 durch den Prozess der rückschreitenden Erosion weiter (MARGRAF 2004). Im Zuge der Dynamisierungsmaßnahmen wurde, um die Durchgängigkeit herzustellen, auf Höhe der Gerinnesohle (oberhalb) eine ca. 2 m breite Engstelle in Rechteckform geschaffen (Abb. 4-22).



Abb. 4-22: Standort am „Wetterloch“. Links: Blick über das gesamte „Wetterloch“ (entgegen der Fließrichtung) mit bereits erfolgtem Durchstich zur Wiederherstellung der aquatischen Durchgängigkeit (Foto: Peter Fischer, 2010); Rechts: Detailaufnahme der Engstelle (Foto: Peter Fischer, 2010).

Standort „1. Rückleitung“

Es handelt es sich um einen weiteren Neubauabschnitt, der die mittlere Anbindung an die Donau darstellt und als die wesentliche Fischaufstiegsstelle und Laichplatz für diverse Fischarten angesehen wird. Hier kann zwischen der gesamten Fließstrecke (ca. 230 m, von der „Nasenbrücke“ bis zur Mündung (= „1.Rückleitung-Fließstrecke“) und dem letzten Prallhang unmittelbar vor Mündung in die Donau (= „1.Rückleitung-Prallhang“) als Standort unterschieden werden (Abb. 4-23 und Abb. 4-24).



Abb. 4-23: Standort an der „1. Rückleitung-Prallhang“. Panoramaansicht des gesamten Prallhangbereichs mit Kiesbank (Foto: Peter Fischer, 2013).



Abb. 4-24: Standort an der „1. Rückleitung-Fließstrecke“. Links: Kiesbank in der 60 Grad Kurve kurz nach der Entstehung. Durch den Altschnee und die Eisränder sind die noch vor kurzem höheren Wasserstände erkennbar (Blick in Fließrichtung, Foto: Peter Fischer, 2012); Rechts: Blick entgegen der Fließrichtung mit noch weitgehend stabilen Uferbereichen (Foto: Peter Fischer, 2012).

5. METHODEN ZUR ERFASSUNG ABIOTISCHER PARAMETER, PROZESSE UND STRUKTUREN

5.1 Hydrologische Arbeiten

5.1.1 Instrumentierung des Untersuchungsgebietes, Datenerfassung und hydrologische Untersuchungen

5.1.1.1. Pegelsysteme und Messung des Wasserstandes

„Naturmessungen sind nicht immer einfach. Dies gilt besonders für komplizierte Geosysteme, wie sie in Flusslandschaften repräsentiert sind. Messungen in fluvialen Systemen stellen daher eine besondere Herausforderung dar“ (BARSCH et al. 1994, im Vorwort).

Wie in Kapitel 1 (Einführung) bereits erläutert und durch zahlreiche Beiträge auch in Kapitel 2 (Forschungsstand) bestätigt, ist Wasser die treibende Kraft im fluvial-morphologischen System. Um demnach die Prozesse der fluvialen Morphodynamik verstehen zu können, muss erst der Blick auf die hydrologischen und hydraulischen (Rand-)Bedingungen gerichtet werden.

Die im Folgenden und in der Hydrologie verwendeten Begriffe, die Kurzzeichen für hydrologische Größen und Einheiten, werden in der DIN 4049 (Hydrologie) genormt angegeben und in zahlreichen Lehrbüchern verwendet (DYCK & PESCHKE 1995, BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Sie werden als bekannt vorausgesetzt.

Im folgenden Text wird der Begriff Abfluss gleichbedeutend mit Durchfluss verwendet. Zur Unterscheidung sei auf die Ausführungen in der Literatur, z. B. DYCK und PESCHKE (1995) oder MORGENSCHWEIS (2010), verwiesen.

Zur Erfassung der hydrologischen Verhältnisse (Grund- und Oberflächenwasser) wurde im Rahmen des Monitoring Projektes (MONDAU) ein dichtes und flächenumfassendes Pegelnetz aufgebaut. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten (siehe Kapitel 4.1) konnte für die Errichtung von Pegeln auf handelsübliche Rammfilter mit entsprechender Verlängerung durch 1¼“-Rohre zurück-gegriffen werden. Diese wurden direkt am Ufer in das kiesig-sandige Substrat geschlagen. An vielen Brückenbauwerken (siehe Kapitel 4.2, Abb. 4-17) wurden bereits während der Baumaßnahmen 2“-Rohre fest vorinstalliert. In all diese Pegelrohre wurden automatische Druckluft-Logger (Diver Datalogger, Schlumberger Water Services) eingesetzt. Diese 19 stationären (permanenten) Pegel und, je nach Ereignis, ein mobiles Pegelsystem, welches sich aus bis zu 30 automatisch loggenden, temporären Pegeln (MDS Dipper T3, Seba Hydrometrie) und weiteren temporären Messlatten (Eigenbau, individuelle Ablesung) zusammensetzt, wurden im Rahmen von MONDAU betreut (FISCHER & CYFFKA in press). Die Wasserstandsaufzeichnung im Umgebungsgewässer, auf die sich hier konzentriert werden soll, erfolgt an sieben dieser Pegelstationen. Für den Großteil dieser *permanenten* Pegel wurde eine Zeitreihe vom 09.06.2010 bis zum 19.07.2013 ausgewertet.

Um die Wasser-stands-dynamik auch außerhalb des Ottheinrichbaches in weiteren Auengewässern während einer ÖF oder GWA zu erfassen, wurden die permanenten Pegel durch *temporäre* Pegel (tPÖF) und Messlatten ergänzt (Abb. 5-1).



Abb. 5-1: Verschiedene Pegel am Ottheinrichbach. Links: Stationärer Pegel (Pegel 13) an der „Alten Donau“ kurz vor dem Auslesen (Foto: Peter Fischer, 2012). Rechts: temporärer Pegel mit Datenlogger im OHB (Foto: Peter Fischer, 2014).

Zur Erfassung des Wasserstandes im Auwald wurden von den insgesamt 86 Pegeln (inklusive Pegel von externen Betreibern) Daten von 36 Pegelmessstellen näher betrachtet. Eine Übersicht kann der Tabelle 4-11 (S. 144) entnommen werden (zur Lage der wesentlichen Pegelstandorte siehe Abbildung 5-2).

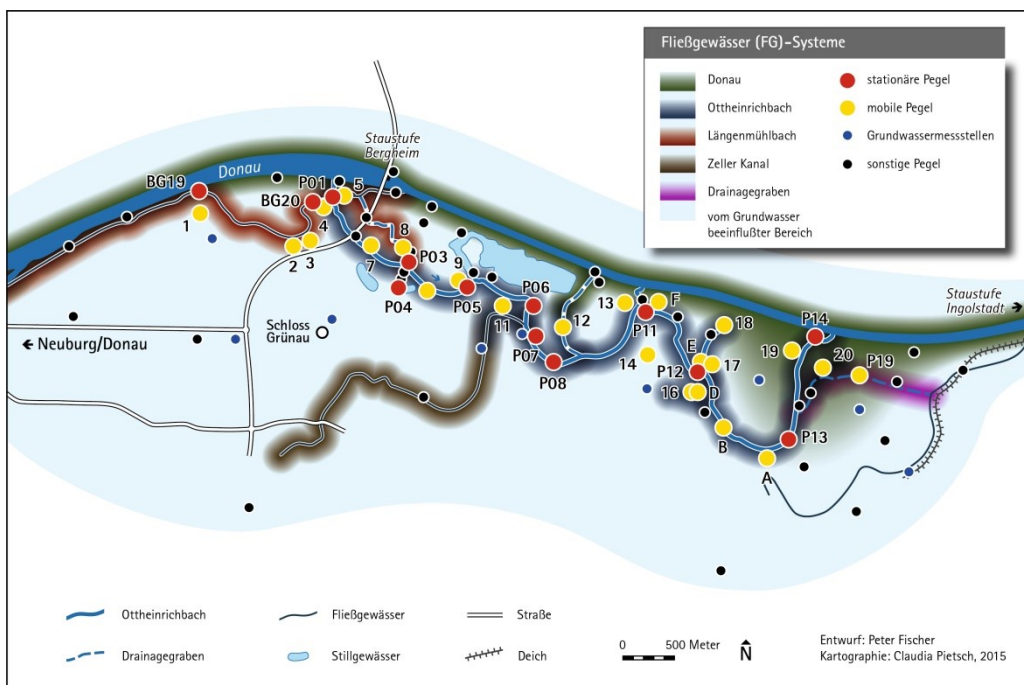


Abb. 5-2: Lage der Pegelstandorte und Fließgewässer-Systeme im PG mit Pegelbezeichnung. rot = stationäre Pegel (P01-P19), gelb = temporäre mobile Pegel (1-19, A-F), blau = Grundwassermessstellen (WWA Ingolstadt), grau = weitere Pegel, auf die im Text und den Abbildungen nicht näher eingegangen wird. Pegel an der Donau: Neuburg, Staustufe Ingolstadt und Ingolstadt Luitpoldstraße sind nicht mehr in dem Kartenausschnitt enthalten (siehe hierzu www.hnd.bayern.de).

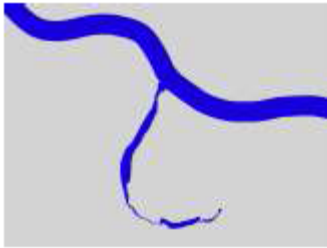
Um die Interpretation zu erleichtern, wurde von FISCHER und CYFFKA (in press) das Gebiet nach dem hydrologischen Vernetzungsgrad schematisch in verschiedene Fließgewässer-Systeme (FG) und in einen vom Grundwasser (GW) dominierten Bereich eingeteilt, in das jeder Pegel eingeordnet werden kann. Für diese Arbeit erfolgte eine Erweiterung um das (temporäre) FG-System des Drainagegrabens (Abb. 4-2).

Tab. 5-1: Fließgewässer-Systeme (FG) im UG und GW-Bereich.

Fließgewässer Systeme	Anmerkungen
FG-Donau	Durch Rückstaprozesse der Staustufen auch Einfluss auf den OHB
FG-Ottheinrichbach (OHB)	Überflutungsbereiche durch Rückstau der Donau bei Hochwasser und bei ÖF, die sich teilweise entgegen der Fließrichtung ausbreiten
FG-Längenmühlbach (LMB)	Transportbahn für Wasserüberleitung bei ÖF
FG-Zeller Kanal (ZK)	Rückstaprozesse an den Durchlässen, besonders im Frühjahr, aber auch bei ÖF
FG-Drainagegraben	Während einer ÖF entsteht eine zusätzliche Anbindung über das Sielbauwerk an die Donau
GW-Bereich	Ausdehnung je nach Wasserstand im jeweiligen FG-Systems

Zusätzlich erfolgt auch, wie bei FISCHER und CYFFKA (in press), eine Orientierung an dem gängigen Klassifikationsschema für Auengewässer. Hierzu wurde nach der Einteilung von AMOROS et al. (1987) bzw. POTTGIESSER und EHLERT (2012) eine Einteilung der Auengewässer in Altgewässer und sonstige Auengewässer vorgenommen und ergänzt (Abb. 5-4). Die Altgewässer lassen sich hinsichtlich ihrer Anbindung an das Hauptgewässer Eupotamon in Para-, Plesi-, oder Paläopotamon unterscheiden (Abb. 5-3, vgl. JUNGWIRTH et al. 2003). Nach SCHWEVERS und ADAM (2010) sind dies neben dem Fließgewässer Altarme (permanent angebunden), Altwasser (episodisch angebunden) und Ur-Altwater (nicht mehr angebunden) (vgl. LÖLF & LWA 1985). Ergänzend zu den Altgewässern sind die sonstigen Auengewässer zu nennen, welche Totarme oder Totwässer, Qualmgewässer, temporäre Auentümpel und Kieseeseen (Baggerseen) beinhalten (Abb. 4-4) (DWA 2010A, POTTGIESSER & EHLERT 2012). Auch lassen sich stehende Gewässer, die außerhalb des tatsächlich von Hochwassern beeinflussten Bereichs liegen, bei denen ein Wechsel von Fließgewässer zu Stillgewässer zu keiner Zeit möglich ist, in diese Kategorie einordnen (GEPP 1985, SCHWEVERS & ADAM 2010).

Parapotamon



Altarm = abgetrenntes ehemaliges Flussbett (Flussabschnitt, Flutmulde, Flutrinne) mit permanenter unter- und/ oder oberstromiger Anbindung an den Fluss und permanenter, im Regelfall mit dem Flusswasserstand mitschwankender Wasserführung

- allmählicher Wasseraustausch zwischen Fluss und Altarm möglich, der zu einer Beeinflussung der Wasserbeschaffenheit im Altgewässer (Nährstoffe, Temperatur usw.) führen kann
- bei niedrigen und mittleren Wasserständen i. d. R. ohne erkennbare Strömung

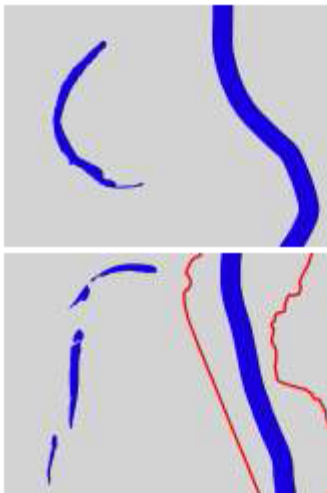
Plesiopotamon



Altwasser = abgetrenntes ehemaliges Flussbett z. B. abgetrennter Määnderbogen bei mäandrierenden Gewässern, nicht mehr durchflossene Rinnen von verzweigten Gewässern oder Flutrinnen der Furkationszone mit episodischer Anbindung an den Fluss und permanenter Wasserführung

- nur bei Hochwasser bzw. bei höheren Wasserständen angeschlossen
- die Wasserbeschaffenheit von Fluss und Altgewässer ist unterschiedlich; bei Hochwasser kann sie sich temporär angleichen

Paläopotamon



Uraltwasser = abgetrenntes ehemaliges Flussbett (Flussabschnitt, Flutmulde, Flutrinne) ohne Anbindung an den Fluss und mit permanenter Wasserführung

- stehendes Gewässer mit der Tendenz zur Verlandung
- Gewässer der rezenten Aue können bei Extremhochwässern, die große Teile der Aue überfluten, noch eine Verbindung zum Fluss haben
- hinterdeichs in der fossilen Auen gelegene Gewässer stehen mit dem Fluss z. T. nur noch über Grundwasser bzw. über Qualmwasser in Verbindung (korrespondieren unterirdisch mit dem Flusswasser); keine Überflutung bei Hochwasser; bei diesen Gewässern kann es sich um ehemals angeschlossenen Altwasser handeln, die durch den Deichbau heute keine Verbindung mehr zum Fluss aufweisen
- die Wasserbeschaffenheit von Fluss und Altgewässer ist dauerhaft deutlich unterschiedlich

Eupotamon



Der **Hauptarm** sowie alle **ständig durchströmten Laufgabelungen oder Nebengerinne** gehören zum Eupotamon.

- bei den ständig durchströmten Laufgabelungen oder Nebengerinnen herrschen in Bezug auf Wasserbeschaffenheit und Morphologie vergleichbare Bedingungen mit dem Hauptarm

Abb. 5-3: Auengewässer nach AMOROS et al. (1987) mit begrifflicher Abgrenzung (POTTGIESSER & EHLERT (2012, S. 14).

Aufgrund der Regulierungsmaßnahmen mit einhergehender Grundwasserabsenkung sowie Unterbrechung von Flutrinnen durch die Anlage und Pflege von Forstwegen setzte bei vielen Altarmen und Altwässern ein Verlandungsprozess ein (LÜDERITZ & JÜPNER 2009). Dies ist auch im PG der Fall. Ergebnis sind meist trockene, selten mit Wasser gefüllte Senken und

Gräben (temporäre Auentümpel), die im Rahmen dieser Arbeit als temporär trocken oder temporär feucht eingestuft werden, da sie u. U. nur bei einer ÖF oder Hochwasser für kurze Zeit mit dem OHB in Verbindung stehen. Der wesentliche Unterschied besteht in der anthropogenen Überprägung dieser Auengewässer (künstlich entstandene Gewässer, nach POTTGIESSER und EHLERT (2012). Neben den natürlichen Auengewässern entstehen in diesen künstlichen Gewässern oft Sekundärbiotope (vgl. SCHOLZ et al. 2005). Im Weiteren wird für diese Arbeit bei den künstlichen Gewässern zwischen Renaturierungsgewässern und Flutungsflächen unterschieden (Abb. 5-4). Erstere wurden speziell aus ökologischen Gründen angelegt oder entstehen eigendynamisch. Eine weitere Unterscheidung in „künstliche“ Flutungsflächen ist daher sinnvoll, da es im PG Flächen gibt, die nur aufgrund spezieller Steuerung überstaut werden können. Auf natürliche Weise würden – zumindest bei den (geringen) Hochwasserabflüssen – an diesen Stellen keine Überflutungsflächen entstehen, da sie zu hoch liegen. Damit ergeben sich etwa neun unterschiedliche Auen-gewässertypen. Jedem dieser Typen können entsprechende charakteristische Ganglinien-verläufe zugeordnet werden, die durch das Pegelnetzwerk aufgezeichnet werden.

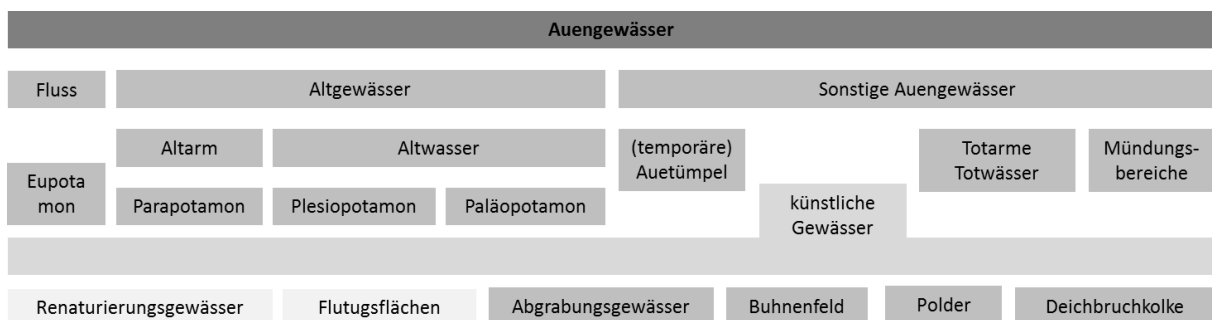


Abb. 5-4: Auengewässer in „naturnahen Auen“ nach POTTGIESSER und EHLERT (2012, S. 15) verändert und ergänzt.

5.1.1.2. Fließgeschwindigkeit und Durchflussmessung

Zur Bestimmung der Durchflusswerte wurden an 12 der Pegelstationen rund 152 Messungen durchgeführt. Zum Einsatz kam eine magnetisch-induktive Strömungssonde (MID) mit einem Messbereich von ± 5 cm/s (Seba Hydrometrie, Flow Sens, Seba 2011). Gerade bei verkrauteten oder feststoffreichen Querschnitten hat die MID gegenüber dem Flügel gewisse Vorteile, während die eigentliche Messung analog der Flügelmessung vollzogen wird (MORGENSCHWEIS 2010). Aus 10 Einzelmessungen der Fließgeschwindigkeit wurde der Mittelwert gebildet, welcher Eingang in weitere Berechnungen fand. Die Profile für die Abflussmessungen wurden – wenn möglich – direkt an einer Pegelstation angelegt. Bei den Messprofilen wurde je nach Gerinnetopographie, meist aber in einem Abstand von 50 cm, eine Vielpunktmessung (MORGENSCHWEIS 2010) in verschiedenen Lottiefen durchgeführt.

Während einer ÖF wurde zusätzlich noch mit dem Salztracer-Verfahren (BENISCHKE & HARUM 1990, HUDSON & FRASER 2005) und über das WWA Ingolstadt mit dem Qliner (Ott

Hydromet) gemessen. Zu weiteren Ausführungen der beiden letztgenannten Methoden zur Durchflussermittlung sei auf MORGENSCHWEIS (2010) verwiesen.

Die Auswertung der Durchflussmessungen erfolgte mit dem Software Programm Biber (V5, Kisters). Mittels der eingegebenen Messwerte und Parameter erstellt das Programm auch die jeweiligen Verteilungsprofile der Fließgeschwindigkeit.

Aus der Messung des Wasserstands und dessen Umrechnung in zugehörige Durchflussmengen über eine Wasserstands-Durchfluss-Beziehung (W-Q-Beziehung) wird über dieses indirekte Verfahren der Durchfluss ermittelt. Da sich noch mehr als in natürlichen Gewässern innerhalb des Untersuchungszeitraumes die Profilgeometrie und damit weitere hydraulisch maßgebliche Bedingungen veränderten, war es nicht möglich, für alle Messstationen gültige Beziehungen abzuleiten. Auch die im Ergebnisteil über das grafische Verfahren ermittelte W-Q-Beziehung für den Pegelstandort P 01 der „Troglücke“ ist nur bis 2012 gültig und zu den tatsächlich gemessenen Durchflüssen wurden 15 % addiert, um die im Querschnitt messtechnisch nicht zu erfassenden Durchflüsse mit zu berücksichtigen. Mit der nachträglichen Erhöhung der Messwerte konnte die beste Übereinstimmung mit den am Ausleitungsbauwerk (hydraulisch besserer Messquerschnitt) gemessenen Durchflüssen erreicht werden. Als bedeutendste Einflussgrößen können neben den Veränderungen der Geometrie durch Erosion, Akkumulation und menschliche Eingriffe auch die sich verändernden Rückstauprozesse sowie die allgemein bekannte Problematik der Anzahl und Verteilung der Messungen über den gesamten Schwankungsbereich genannt werden.

5.1.1.3. Abfluss- und Wasserstandsdaten von externen Datenquellen

Besonders für die Donau, aber auch für weitere Gewässer im PG wurden weitere Pegeldata anderer Betreiber und hydrologisch relevante Informationen (siehe Kapitel 5.1.1.4) ausgewertet. Die unterschiedlichen Pegelsysteme sind verschiedenen Betreibern oder Behörden (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), WWA Ingolstadt, E.ON Wasserkraft GmbH (E.ON) und den Ingolstädter Kommunalbetrieben (In Kb)) zuzuordnen. In vorliegender Arbeit wird der Fokus auf den OHB und den umliegenden Bereich gelegt, daher wird auch nur eine Auswahl von Messstationen betrachtet. Es fließen dennoch auch Informationen und Erkenntnisse der anderen Pegelstationen oder Ganglinienanalysen mit in die Interpretation und Diskussion ein. Klare Grenzen können bei hydrologischen Betrachtungen ohnehin nicht gezogen werden.

Die Abflussdaten an den Stauhaltungen und Ausleitungsbauwerken oder den (inzwischen) online verfügbaren Tagesmittelwerten vom Pegel Ingolstadt (Luitpoldstrasse) sind hier als die wichtigsten zu nennen. So wurde z. B. aus den Daten von 1924 bis 2014 vom Durchfluss am Pegel Ingolstadt neben der Ganglinie eine Dauerlinie generiert. Für die Fragestellung sind besonders die Hochwasserereignisse zwischen $600 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abflussbereich in dem eine ÖF durchgeführt wird), ein Durchfluss über $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$ (natürliche Flutung über das Streichwehr, Kapitel 4, Abb. 4-14), sowie ein Durchfluss unter $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (ab diesem Wert wird die GWA umgesetzt) interessant (vgl. Kapitel 4, Abb. 4-8).

Auch wenn die Grundwasserstände für die fluvial-morphologischen Prozesse eine eher untergeordnete Rolle spielen, nehmen sie doch indirekt Einfluss, vor allem durch die Bewegungsrichtung des Grundwassers. Auftriebs- und Strömungskräfte sowie der Porenwasserdruck sind als Einflussfaktoren zu nennen, werden aber nicht weiter berücksichtigt. Auch der Wasserstand im UG_{Gew} und die Bodenfeuchte werden durch die Grundwasserhältnisse beeinflusst, welche Auswirkungen auf die Standsicherheit von Böschungen haben können. Die Veränderung der Grundwasserhältnisse durch die Maßnahmen wurde bereits in Kapitel 4.1.3.3 aufgezeigt.

5.1.1.4. Wasserspiegelberechnung, Grundwassermodellierung, Luftbilder und andere Planungsunterlagen

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung zu den Veränderungen des Gerinnes bzw. des FG und zur Sekundärauenentwicklung wurden auch verschiedene Eingangsdaten verwendet, die nicht selbst erhoben wurden. Vor allem sind dies Daten, die zum Teil mittels fernerkundlicher Methoden gewonnen wurden, zum anderen fließen Ergebnisse aus diversen Planungsunterlagen und Berichten mit ein, von denen die wichtigsten hier genannt sein sollen. Meist war es nötig, diese für die vorliegende Untersuchung entsprechend aufzubereiten oder mit eigenen Ergänzungen zu erweitern, um die Aussagekraft für die spezielle Fragestellung zu verstärken.

Als Basisdatensätze wurden die folgenden verwendet:

- digitales Höhenmodell (2 m Auflösung) aus ALS-Befliegung, Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG), seit 2014 (LDBV)
- Luftbilder (digitale Orthophotos) aus den Jahren 2009, 2011 und 2013 in unterschiedlicher Auflösung (LVG)
- topographische Karten (TK 25, 7233 Neuburg a. d. Donau, 7234 Ingolstadt) (LVG)
- geologische Karten (GK 25, 7233 Neuburg a. d. Donau, 7234 Ingolstadt) (LVG)

Planungsunterlagen und andere Informationen:

- Auswertung der Grundwassermessdaten (SCHLEGEL 2000A, 2001A)
- Hochwasserabflusssituation im Auwald (SCHLEGEL 2000B, 2001B, 2001BB)
- Hydraulische Berechnung des Umgehungsgerinnes (SCHLEGEL 2000C, 2001C)
- Hochwasserfixierung im Auwald (SCHLEGEL 2000D)
- Planfeststellungsbescheid (SCHLEGEL 2004)
- Machbarkeitsstudie „Auenkonzept Ingolstadt“ vom WWF-Aueninstitut (DISTER 1997)
- Überflutungssituation (Karte) im Mai 1999 (MARGRAF 2004)
- Informationen aus dem Kartendienst Flussauen in Deutschland (BFN o.J. unter: www.geodienste.bfn.de)

Zwei wichtige Grundlagendaten sind zudem die 2D-Wasserspiegel-Berechnung Teil A und die Grundwassermodellierung Teil B (RMD CONSULT 2004A, 2004B), auf die hier etwas näher eingegangen werden soll, da beide Teile sowohl für die Bemessung der Ausleitungsmengen als auch für die Ausbreitung der Flutungsflächen (Prognose) eine entscheidende Rolle spielten.

Für die 2D-Wasserspiegel-Berechnung der Ökologischen Flutungen (RMD CONSULT 2004A) wurde ein Bemessungsereignis mit folgenden Durchflüssen (Q) verwendet:

- Q-Donau mit 650 – 1020 m³/s (nach generierter HQ1-Ganglinie)
- Q-LMB mit 1,5 m³/s
- Q-Ausleitungsbauwerk Ökologische Flutung mit 25,0 m³/s
- Q-Ausleitungsbauwerk OHB mit 5,0 m³/s.

Die Dauer einer Ökologischen Flutung wurde auf sieben Tage angesetzt. Dies bildet die Grundlage für das Berechnungsmodell, aus dem sich die aktuellen Ausleitungsmengen bei einer ÖF ergeben.

Die angeführten Abflüsse führen nach Anlage A05-05a (RMD CONSULT 2004A) zu rund 26,5 m³/s (mit LMB) am Rechteckdurchlass im FG-LMB (Nr. D 2, Abb. 3-17) vor der „Trogbrücke“ und zu weiteren 5 m³/s Zufluss von der „Trogbrücke“ (OHB).

Eine Abflussaufteilung im Auwald erfolgt dann nach der „Pionierbrücke“, bis zu der rund 30 m³/s fließen, in:

- 4,0 m³/s werden über die „temporäre Rückleitung ÖF“ abgeführt, wobei dann
- 14 m³/s von den restlichen 26 m³/s weiter über die „1. Rückleitung“ der Donau zufließen und
- 12 m³/s weiter über das Alarmsystem der „Alten Donau“ gelangen sollen.

Im Planfeststellungsbescheid (SCHLEGEL 2004) wird dagegen von einer über die drei Anbindungen gleichverteilten Rückleitung von jeweils 10 m³/s in die Donau ausgegangen.

Das Grundwassermodell Teil B (RMD CONSULT 2004B) zeigt die geohydraulische Situation des Prä-Dynamisierungszustandes und lässt infolge der ÖF (Kalibrierung mit dem Hochwasserereignis März 2001 und Simulation mit dem Grundwasser-Oberflächenwasser-Modell) die deutlich erhöhten Grundwasserstände erkennen. Im Bereich des Jagdschlusses Grünau wäre nach dem Modell mit einem Anstieg von 0,70 m auf 374,7 m zu rechnen.

5.1.1.5. Kartierung von Überflutungsflächen und Wasserwechselzonen

Zur Beurteilung der (sekundären) Auenentwicklung ist die Kenntnis der Überflutungsflächen und Wasserwechselzonen von zentraler Bedeutung. Dazu zählen die flächenhafte Ausdehnung, Überstauhöhen, Strömungsverhältnisse und Informationen über die Veränderung, also die Dynamik dieser Standorte.

Eine Unterscheidung zwischen Überflutungsflächen und Wasserwechselzonen erfolgt nach dem Wasserstand im FG. Überflutungsflächen werden nur bei Hochwasser bzw. im PG auch durch ÖF erzeugt und liegen demnach über dem mittleren Wasserstand (MW).

Um die flächenhafte Ausdehnung bei Flutungsereignissen zu erfassen, wurde bei 10 ÖF und dem Juni-Hochwasser 2013 eine GPS- und dGPS- gestützte Kartierung der Wasserflächen vorgenommen. Für eine Überflutungsfläche von rund 86 Hektar, wie sie bei den meisten bisher erfolgten ÖF auftrat, wurde eine Strecke von 54 km (Uferlänge der überschwemmten Flächen) digitalisiert. Diese Abschätzung erfolgte zum einen über eine Kartierung im Gelände (etwa 18 km), zum anderen über die Interpretation von Pegeln und Luftbildern etc. Je nach Verfügbarkeit mussten dabei verschiedene GPS-Systeme verwendet werden (Garmin-HCX, Garmin-eTrex, Fujitsu-Siemens-Tablet PC Stylistik mit GPS-Empfänger, Leica GS09, SSeries-BAP Precision) sowie die den Systemen eigenen Softwareprogrammen (Map Source, Fin View, Smart Works und Leica GeoOffice, Arc Pad). Die so gewonnenen Daten wurden alle in ein einheitliches Datenformat gebracht und im ArcGIS nachbearbeitet.

Auf gleiche Weise wurde auch bei der ersten Grundwasserabsenkung (14.11.2011 bis 13.12.2011) und einer Testphase mit niedrigen Ausleitungsmengen (14.06.2012 bis 30.07.2012) verfahren, um die Wasserwechselzonen bei variierenden Ausleitungsmengen zu erfassen. Für den Bereich südlich des Albenschüttweihers wurden zu gestaffelten Ausleitungsmengen (1,0 m³/s, 1,25 m³/s, 1,5 m³/s, 1,75 m³/s, 2,0 m³/s) im Sommer 2012 einzelne Kartierungen durchgeführt. Weitere Flächen entlang des UG_{Gew} zu drei definierten Wasserständen wurden bereits durch BÖHM (2011) erfasst. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ausdehnungen der Wasserflächen wurden ebenfalls in der vorliegenden Arbeit mit berücksichtigt. Wasserwechselzonen können ähnlich wie Auengewässer ebenfalls nach der Art ihrer Anbindung an das UG_{Gew} klassifiziert werden (vgl. Kapitel 5.1.1.1). Bei der Auswertung wurde zwischen einer oberflächlichen Verbindung zwischen Fließgewässer und Überschwemmungsbereich oder Flächen, welche unterirdisch durch Grund- oder Qualmwasserströme zusammenhängen, unterschieden.

Exkurs zur Positionsbestimmung mit Satellitensystemen im Auwald

Für die Kartierungen der hydrologischen Verhältnisse und als Grundlagendaten für fluvial-morphologische Analysen dient eine detaillierte Geländeaufnahme des Meso- bis Mikroreliefs sowie eine gewisse Anzahl an Vermessungspunkten zur Lage- und Höhenbestimmung oder zur Verortung von verschiedenen Messstationen.

Diese Aufgaben können seit 1970 mit zunehmender Genauigkeit über verschiedene Satellitensysteme und die entsprechenden Empfangsgeräte relativ leicht bewerkstelligt werden. Das bekannteste unter den „Global Navigation Satellite Systems“ (GNSS) ist das NAVSTAR/GPS und das GLONASS-System welche neben EGNOS bei den Vermessungsarbeiten eingesetzt wurden (zur weiteren Ausführung der Satellitensysteme siehe z. B. KAHMEN (2005) oder ZOGG (2011)).

Das im Zuge der Arbeit am häufigsten verwendete System kann als *Precise Differential Global Positioning System (PDGPS)* oder geläufiger *RTK-GPS (Real Time Kinematic)* bezeichnet werden (KAHMEN 2005). Das Messsystem Leica GS09 GNSS besteht neben den GS09 GNSS Empfängern aus einer Kombination des sogenannten CS09 Feld-Controller, also ein mobiles, handgetragenes Messgerät, und einer stationären Referenzstation (RTK Basisstation) (Tabelle 4-2, LEICA 2009), zusammen im Folgenden abgekürzt als dGPS. Die Abkürzung GPS ist inzwischen auch in der Fachsprache so weit verbreitet, dass die Bezeichnung für alle Satellitennavigationssysteme benutzt wird, so auch in dieser Arbeit.

Tab. 5-2: Information zum Leica GS09 GNSS (Herstellerangaben, LEICA 2009).

Satellitensignal-Empfang	GPS: L1, L2, L2C (C/A, P-, C-Code) GLONASS: L1, L2 (C/A, P Narrow Code)
DGPS/RTCM	Typischerweise 25 cm (rms)
RTK Rapid-Static (Phase)	Horizontal: 5 mm + 0.5ppm (rms)
Statischer Modus nach dem Initialisieren	Vertikal: 10 mm + 0.5 ppm (rms)
RTK Kinematisch (Phase)	Horizontal: 10 mm + 1ppm (rms)
Bewegter Modus nach dem Initialisieren	Vertikal: 20 mm + 1 ppm (rms)

Bei den Messkampagnen sollte darauf geachtet werden, dass der maximale Abstand zwischen Rover und Referenzstation (~1000 m, im freien Feld) nicht überschritten wird, da die Station Korrekturdaten berechnet und an den Rover sendet. Selbstverständlich benötigen beide Systeme immer ausreichend Satellitenempfang – was in den Donauauen nicht immer gegeben war.

Wie im Gebirge, so auch im Wald, spielt der DOP-Wert (Dilution of Precision) bei Messprojekten eine entscheidende Rolle und sollte im Idealfall bei der Planung berücksichtigt werden (ZOGG 2011). Dies kann bei Flutungsereignissen praktisch nicht oder nur schlecht bewerkstelligt werden. Die Folgen sind, aufgrund von ungünstigen geometrischen Konstellationen, Abschattungen, die im schlimmsten Fall zu einem kompletten Signalverlust führen.

Die absolute Genauigkeit der Position ist bei fehlender Verortung der Referenzstation in einem bekannten Vermessungsnetz nicht besser als bei einem normalen GPS-Empfänger. Deswegen wurde die Referenzstation auf Rückmarken oder auf selbst erzeugten Vermessungspunkten, welche entweder mit dem Tachymeter oder mit dem GS09 GNSS eingemessen wurden, aufgestellt. Damit konnten meist zufriedenstellende Genauigkeiten (1-10 cm) erzielt werden, dennoch musste manchmal auch mit einer Koordinatenqualität von 2,0 m und schlechter weiter gearbeitet werden, da die Messung unter Vegetationsbedeckung nur mit Einschränkungen möglich ist (vgl. SIGRIST et al. 1999, YOSHIMURA & HASEGAWA 2003,

BAKUŁA et al. 2009). Je nach Vermessungsobjekt und Ziel der Vermessung bzw. geforderter Genauigkeit wurde entschieden (manchmal im Feld, manchmal beim Postprocessing), ob die Messpunkte verworfen wurden oder nicht.

Im weiteren Verlauf der Untersuchung (ab 2013) wurde mit dem GS09 auch mit dem Satellitenpositionierungsdienst SAPOS Bayern (bzw. mit SAPOS HEPS, dem Hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service) und den Korrekturdaten der Referenzstation (Eichstätt) gearbeitet, was das aufwändige Einmessen und Verorten von eigenen Vermessungspunkten hinfällig machte.

Bei Messungen mit den anderen (handelsüblichen) GPS-Handgeräten und Tablet-PCs mit GPS-Empfänger, wie sie bei manchen Kartierungen eingesetzt wurden, wird die absolute Genauigkeit mit 3-5 m angegeben (RESNIK 2002, KOWOMA 2007). Damit liegen 50 % der Messwerte innerhalb eines Kreises mit dem angezeigten Radius. Auch wenn die absolute Genauigkeit wesentlich schlechter ist, stimmt die relative Lage der Messpunkte zueinander (nach eigenen Erfahrungen) wesentlich besser überein (< 3m), kann aber auch auf 30 m ansteigen (vgl. THOMAS & GARBE 2003). Die Genauigkeit der Höhenangaben sind bei den Geräten etwa doppelt so schlecht wie die Lagegenauigkeit (Tab. 5-2, vgl. KAHMEN 2005).

Ein noch neues Verfahren, ausgedehnte Überflutungsflächen zu dokumentieren, stellt die Erfassung aus der Luft über kleine unbemannte Luftfahrzeuge dar. Auf diese Methode wird, um Wiederholungen zu vermeiden, im Rahmen anderer Anwendungsmöglichkeiten mit einem Fallbeispiel in den Kapiteln 6.2.2.3 und 6.2.4.4 näher eingegangen. Die Überflutungsflächen bei ÖF und Hochwasser wurden im Wesentlichen über die Kartierung von Boden aus erfasst, da nur wenige Bereiche nicht im Wald oder Unterholz liegen, diese oft durch eine Streuauflage bedeckt sind und deshalb zur Befliegung nicht geeignet sind.

5.1.2 Auswertung, Berechnung und Analyse hydrologischer Daten

5.1.2.1 Methodik und statistische Verfahren

Die Auswertung der Durchflussmessungen erfolgte mit dem Software Programm Biber (V5, Kisters). Mittels der eingegebenen Messwerte und Parameter erstellt das Programm auch die jeweiligen Verteilungsprofile der Fließgeschwindigkeit. Alle weiteren Auswertungen wurden mit Excel, Origin oder mit der Open Source Software R erledigt.

Hierzu wurden, neben den bereits standardmäßig installierten, folgende zusätzliche R-packages angewendet:

zoo: (ZEILEIS & GROTHENDIECK 2005)

xts: (RYAN & ULRICH 2010)

hydro TSM: (ZAMBRANO-BIGIARINI 2012)

Bei der Vielzahl unterschiedlichster Daten (langjährige, mittlere und kurze Zeitreihen, Stichtagsmessungen, unterschiedliche Log-Intervalle etc. bieten sich auch entsprechend vielfältige Methoden zur Analyse an. Bei kürzeren Datenreihen, wie sie für die meisten Ereignisse vorliegen, muss eine Analyse einzelner Abflussereignisse erfolgen (SCHÜTT 1994). Liegen längere Datenreihen vor oder sollen diese mit benachbarten Stationen verglichen werden, so müssen sie sich über den gleichen Zeitraum erstrecken. Entsprechend wurden die Datenreihen, wenn nötig, angepasst und einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Datenlücken wurden, wenn nötig, über geeignete Schätzverfahren geschlossen.

Daraus ergeben sich zum Teil – je nach Pegelstandort und Ziel der Auswertung – unterschiedlich lange Datenreihen bzw. mit unterschiedlichsten Start- und Endpunkten, u.U. auch für gleiche Standorte. Was auf den ersten Blick kurios erscheinen mag, wird klarer, wenn man bedenkt, dass ein anfänglicher Wasserstandsanstieg durch die Inbetriebnahme des OHB nicht in die Analyse der durch die Dynamisierungsmaßnahmen bedingten Wasserstandsschwankungen eingehen sollte. Auf weitere Details kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden, erklärt aber, dass es zu unterschiedlichen Angaben bei den Datenreihen kommt. Die als Beobachtungszeitraum deklarierte Zeitspanne (09.06.2010 bis 19.07.2013) stellt damit das Fenster dar, welches je nach Datenlage in beide Richtungen verlängert wurde.

Die Darstellung der Daten der verschiedenen Pegel im Ergebnisteil werden vor allem in Form von Ganglinienverläufen präsentiert. Der Verlauf der Wasserstände lässt sich auf verschiedene Ursachen wie z. B. der Veränderung des Donauabflusses, Ökologische Flutung oder andere Steuerungsmaßnahmen zurückführen. Diese Reaktionen sind sowohl für die hydrologische als auch morphologische Betrachtung von wesentlichem Interesse. Um über eine Beschreibung der Zeitreihen hinaus belastbare Aussagen formulieren zu können, werden zusätzlich auch statistische Verfahren eingesetzt.

Für eine erste Übersicht und Auswertung bieten sich deskriptive Verfahren an, die die Wasserstandsdynamik am UG_{Gew} abbilden. Als Kennwerte bzw. Hauptwerte nach DIN 4049 dienen die minimalen, mittleren und maximalen Wasserstände (W) bzw. Durchflüsse (Q) sowie die absolute (maximale) Schwankungsamplitude.

Für die jeweilige Messreihe (Tag, Monat, Jahr oder gesamte Beobachtungsperiode) werden demnach Minima, Mittelwerte und Maxima des jeweiligen Zeitraumes angegeben. Für die Monate oder Jahre der gesamten Zeitreihe kommen zusätzlich die mittleren Minima und Maxima der Werte sowie die niedrigsten und höchsten Werte zum Einsatz.

Über die Dauerlinie lässt sich ablesen, wie häufig, also an wie vielen Tagen, ein bestimmter Wert über- oder unterschritten wird. Damit bildet sie eine wesentliche Grundlage für wasserwirtschaftliche Analysen und wurde für die Donau für die lange Zeitreihe 1924 bis 2014 und für die letzte fünf Jahre (01.01.2010 bis 31.12.2014) berechnet.

Um die Ähnlichkeit zwischen Pegelständen zu prüfen, wurde nach einer Normierung um den Mittelwert (Subtraktion) und die Bereinigung der Amplitude mittels Division durch die Standardabweichung die euklidische Distanz berechnet.

Für die Donau und den OHB wurden für verschiedenen Zeitspannen auf Basis von Tagesmittelwerten die Durchflüsse (Q) oder Wasserstände (W) in Ganglinien, die Spannweite und Veränderung der monatlichen Q- oder W-Werte in Box-Plot-Diagrammen und die Häufigkeiten in Form eines Histogramms dargestellt. Dabei erfolgt die Darstellung des Box-Plots in üblicher Vorgehensweise, mit der Hälfte an Fällen in der „Box“ mit dem 25 %- und 75 %-Perzentil und dem Median als Querstrich. Über die sich daran anschließenden Antennen („Whisker“) lassen sich Minimum und Maximum ablesen. Die Klassenbildung bei den Histogrammen erfolgte nach der von STURGES (1926) vorgeschlagenen Methode.

5.1.2.2. Berechnung von hydraulischen Parametern

Eine Berechnung von Kenngrößen erlaubt eine vergleichende Darstellung unterschiedlicher Standorte im Fließgewässern und auch Vergleiche zu anderen FG, die wiederum eine Einordnung in den Grad der Naturnähe des OHB ermöglichen. Des Weiteren lassen sich für einzelne Querschnitte charakteristische Parameter quantifizieren.

Bewertung der Abflusssdynamik

Der Abflusscharakter eines FG wird im aquatischen- und im Uferbereich erfasst und kann durch das Abflussregime und die Abflusssdynamik beschrieben werden.

Nach BAUMGARTNER und LIEBSCHER (1996) ist im Gang der mittleren monatlichen Wasserstände oder Durchflussmengen, der Anzahl und Dauer der Abflussmaxima und – minima sowie der Lage dieser Werte im Jahresverlauf das Abflussregime eines Flusses zu beschreiben. Die Dynamik, also die Unterschiede im Abfluss über die durchschnittlichen, langjährigen Amplituden der Durchflussmengen, wird als Quotient der mittleren Hochwasser- und der mittleren Niedrigwasserabflussmengen (MHQ: MNQ) berechnet (DVWK 1984). Nach KERN (2000) und HILLENBRAND und LIEBERT (2001, beide in HUGO et al. 2012) können weitere Einzelparameter beschrieben werden (Tab. 5-3). Die relative Abflusssdynamik kann über das Verhältnis von $HQ_2 : MNQ$ ($HQ_2 =$ bordvoller Abfluss) und die Geschwindigkeit der Abflusszu- und -abnahme angegeben werden. Für den OHB wurden als HQ_2 25 m³/s veranschlagt und zusätzlich aus den bereits genannten Gründen (siehe Kapitel 5.1.1.2) die Wasserstände statt der Abflüsse verwendet. Unter der Annahme, dass der MHQ dem bordvollen Abfluss (Q_{BV}) des natürlichen Gewässerbettes nahe kommt, kann das Verhältnis Q_{BV}/MHQ als Maß für die Naturnähe der hydraulischen Verhältnisse gesehen werden (SCHERLE 1999).

Die Hochwasserdynamik kennzeichnet den langjährigen, durchschnittlichen Verlauf von Hochwasserereignissen. Die Überflutungsdauer und Überschwemmungshäufigkeit (Hochwasserwahrscheinlichkeit) sind weitere wichtige Kenngrößen. Letztere kann für die Donau den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen werden und wurde bereits im Kapitel 4, Tabelle 4-3, für den Pegel Ingolstadt berechnet und dargestellt.

Tab. 5-3: Verhältniszahlen zur Charakterisierung der Abflussunterschiede und Wasserstände nach DVWK (1984) und HUGO et al. (2012).

Abflussunterschied	MHQ : MNQ	MHW : MNW	HQ ₂ : MNQ (Rel. Abflussdynamik)
sehr gering			0-30
gering	< 20:1	< 20:1	> 30-80
mittel	21:1 bis < 50:1	21:1 bis < 50:1	> 80-150
groß	51:1 bis < 100:1	51:1 bis < 100:1	> 150-400
sehr groß	> 101:1	> 101:1	> 400

Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit, des Rauheitsbeiwerts und des bordvollen Abflusses

Neben morphometrischen Parametern (z. B. Tiefen- und Breitenmaße), die im nächsten Kapitel näher behandelt werden, konnten im Wesentlichen aus den Querprofilaufnahmen (siehe dazu auch Kapitel 5.2.3) hydraulische Parameter (wie Fließquerschnittsfläche, hydraulischer Radius, mittlere Fließgeschwindigkeit etc.) am Querprofil abgeleitet werden. Mit diesen ermittelten Werten können folglich Aussagen zum morphologischen Zustand getroffen bzw. abgeschätzt werden, ob oder wie weit entfernt sich der OHB von einem „dynamischen Gleichgewichtszustand“ befindet.

Die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit nach MANNING (vgl. MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980, NAUDASCHER 1992) erfolgt nach:

$$v_{\text{mit}} = \frac{1}{n} \cdot R_{\text{hy}}^{2/3} \cdot I_E^{1/2}$$

- mit v_{mit} : mittlere Fließgeschwindigkeit [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 n : Rauigkeitskoeffizient nach Manning [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$]
 R_{hy} : hydraulischer Radius [m]
 I_E : Gefälle der Energielinie [-]

Die von GAUCKLER, MANNING und STRICKLER experimentell und empirisch entwickelte Gleichung enthält neben den Parametern R_{hy} und I , die aus Vermessung und Berechnung bestimmt werden können (siehe unten), den Rauheitsbeiwert n . Wobei gilt:

$$k_{\text{St}} = \frac{1}{n}$$

Die Abschätzung des Rauigkeitskoeffizienten n (MANNING) bzw. des STRICKLER-Beiwertes k_{St} erfolgte über die Tabellen von CHOW (1959), DVWK (1991), LANGE und LECHER (1993), BOLLRICH (1996 alle in LFU 2003) und NAUDASCHER (1992). In diesen Arbeiten wird für natürliche Wasserläufe mit mäßiger Geschiebebewegung bzw. verkrautete FG ein Wert zwischen 30-35 angegeben. Da beide Werte über kein rechnerisches Verfahren bestimmt werden können, sondern geschätzt werden, erhält auch das Ergebnis, die mittlere Fließgeschwindigkeit, den Charakter einer subjektiven Einschätzung. Da unter der Annahme gleichförmigen Fließens das Energieliniengefälle durch das Sohlgefälle bzw. das Wasserspiegelgefälle ersetzt werden kann, fand hier das Sohlgefälle Verwendung (HARNISCHMACHER 2002, GRAF & ALTINAKAR 2003). Dies wurde anhand der geplanten Gerinnesohle aus den Planungsunterlagen entnommen und mit 0,06 % berechnet (SCHLEGEL 2004, Längsschnitt 31). Nach eigenen Erhebungen im Jahr 2015 kann das Gefälle im Längsprofil je nach Abschnitt stark schwanken. Die anderen Variablen konnten aus den Vermessungsdaten, die im Zuge der QP-Vermessung aufgenommen wurden, bestimmt werden. So konnte für jeden QP-Standort neben der mittleren Fließgeschwindigkeit auch der bordvolle Abfluss = Q_{BV} berechnet werden (LEOPOLD 1964, GRAF & ALTINAKAR 2003).

$$Q_{BV} = \frac{1}{n} \cdot R_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2} \cdot A$$

mit Q_{BV} : bordvoller Durchfluss [$m^3 \cdot s^{-1}$]
 A : durchströmter Querschnitt [m^2]

Zur Übersicht sind die berechneten und gemessenen Größen in der Tabelle 4-4 noch einmal zusammengefasst.

Tab. 5-4: Übersicht über die berechneten hydrologischen und hydraulischen Parameter.

Variable/Parameter	Beschreibung	Berechnung/ Bestimmung	Formel
W	Wasserstand	Pegeldaten	-
Q	Abfluss	W/Q-Beziehung	$Q = A \cdot v_{mit}$
Q_{BV}	Abfluss (bordvoll)	Berechnung	$Q_{BV} = \frac{1}{n} \cdot R_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2} \cdot A$
v_{mit}	Mittlere Fließgeschwindigkeit	Messung	$v_{mit} = Q/A$
v_{mit}	Mittlere Fließgeschwindigkeit	Berechnung	$v_{mit} = \frac{1}{n} \cdot R_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2}$
V_{MAX}/V_{MIN}	Maximale/Minimale Fließgeschwindigkeit	Messung	V_{MAX}/V_{MIN}
k_{St}	Strickler Beiwert	Literatur	$k_{St} = v_m \cdot R_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}$
n	Manning Beiwert	Literatur	$n = 1/(v_m \cdot R_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2})$

5.2 Methoden zur fluvial-geomorphologischen Aufnahme

Die Fluvialmorphologie als Teil der geomorphologischen Forschung ist die Wissenschaft von der Entstehung der Gewässer, von Überschwemmungsflächen, Fließgewässerformen und den Gewässerdimensionen infolge der Einwirkung des fließenden Wassers. Die Methoden zur Erfassung der hydrologischen Verhältnisse, wie Abflussdynamik und Überflutungssituationen, wurden im letzten Kapitel beschrieben. Durch verschiedene Prozesse, welche durch variierende Abflussverhältnisse ausgelöst werden, werden Sediment und andere Materialien kontinuierlich – manchmal in Schüben – bewegt und umgelagert. Als Ergebnis entstehen und verändern sich gewässertypische morphologische Formen wie Prallhänge, Kiesbänke und Uferbereiche – später Lebensräume am neuen Aurbach.

Um die im Vorfeld ablaufenden Prozesse, die Genese dieser Pionierstandorte, aber auch deren Form zu erfassen, wurde mit modernen Vermessungsmethoden, wie ground-based LiDAR (Light Detection and Ranging), UAV (Drohnenbefliegung) und GNSS, oder klassischen, wie Tachymetrie und Nivellement, gearbeitet.

An dieser Stelle sei auch auf die über 8500 Fotos hingewiesen, die im Laufe der Zeit aufgenommen wurden, und die einzelnen Zeitrafferkamera-Sequenzen, die an ausgewählten Standorten aufgenommen wurden. Diese waren besonders hilfreich, Ergebnisse einzelner Standorte im Rückblick zusammenhängend zu interpretieren.

5.2.1 Berechnungen zur morphologischen Typisierung

Wie bei der Erfassung der Überflutungsflächen und Wasserwechselzonen wurden Daten aus unterschiedlichen Kartierungen, Planungsunterlagen und Ergebnisse aus diversen Vermessungsdaten (Querprofilvermessung, Vermessung mit einem Laserscanner und dGPS) im ArcGIS nachbearbeitet und zur Auswertung zusammengefügt.

Die gewonnenen Größen lassen sich neben den reinen Vermessungsdaten zur Lage und Höhe in morphometrische Parameter des Laufmusters (Sinuosität, Mäanderbogen, Krümmungsradien) und des Gerinnequerschnittes (Tiefen, Breiten, etc., siehe Kapitel 5.2.3) unterteilen. Auch diese Variablen lassen insbesondere in ihrer Kombination oder im Vergleich zueinander, aber auch im Vergleich zu experimentell und durch Feldmessungen bestimmten Gesetzmäßigkeiten Aussagen über den Gleichgewichtszustand im OHB zu.

Der Gerinnegrundriss oder die Linienführung (Draufsicht auf einen Laufabschnitt) kann anhand historischer Karten rekonstruiert und mit dem aktuellen Zustand verglichen werden, was von MARGRAF (2004) für den Donauabschnitt bereits gezeigt wurde. Veränderungen können so quantifiziert und bewertet werden. Zur Charakterisierung der Linienführung wird nach DIN 4049 (vgl. LEOPOLD & WOLMAN 1957, LEOPOLD et al. 1964, MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980, DVWK 1984) in Abhängigkeit von der Flussentwicklung zwischen gestreckten, verzweigten oder gewundenen (mäandrierenden) Grundrissen unterschieden.

Ob ein Gewässer Mäander ausbildet und in welcher Form dies geschieht, hängt von vielen Faktoren ab. Als Anhaltspunkt für eine potentiell natürliche Linienführung wird immer wieder die Graphik von LEOPOLD und WOLMAN (1957, vgl. auch MANGELSDORF & SCHEURMANN

1980) herangezogen (Abb. 5-5), wobei die Linienführung entscheidend von Abflussmenge und Gefälle abhängt.

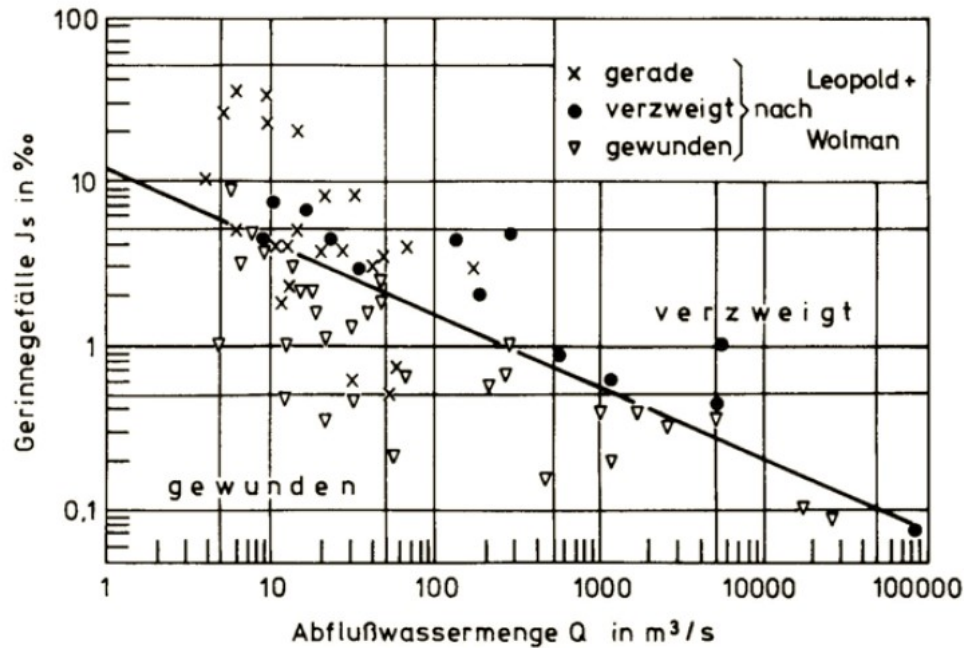


Abb. 5-5: Linienführung in Abhängigkeit von Gefälle und bordvollem Abfluss nach LEOPOLD und WOLMAN (1957 in MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980 in LFW 2005, S. 24).

Ein Maß für die Intensität des Mäandrierens eines Flusses ist die Sinuosität. Sie wird als Quotient aus der Flusslänge und der Distanz (Luftlinie) zwischen Anfangs- und Endpunkt berechnet. In Anlehnung an MUELLER (1968) wird mit P die Gesamtsinuosität betrachtet, diese ist auch nach HARNISCHMACHER (2002) unter gegebenen Bedingungen zur Kennzeichnung der rezenten hydraulischen Prozesse geeignet (vgl. LEOPOLD & WOLMAN 1957, MUELLER 1968):

$$P = \frac{IF}{c}$$

- mit P: Sinuosität
- IF: Flusslänge (zwischen zwei Punkten)
- c: Länge der kürzesten Strecke (zwischen den Punkten)

Ab einem Windungsgrad (Sinuosität) von > 1,5 spricht man von Mäandrieren (vgl. LEOPOLD & WOLMAN 1957, BRIEM 2002, SCHWALLER & TÖLLE 2005). Nach MANGELSDORF und SCHEURMANN (1980) und DIN 4049 kann die Beschreibung des Grundrisses mit den Parametern Flussentwicklung, Laufentwicklung und Talentwicklung erfolgen. Die Berechnung der Flussentwicklung eF kann über die untere Formel erfolgen:

$$eF = \frac{IF - c}{c}$$

mit eF: Flussentwicklung

Auch diese Verhältniszahl kann als Alternative zur Sinuosität herangezogen werden und ist entsprechend der Variablen dann um 1 kleiner als die Werte der Sinuosität. Je kleiner die Maßzahlen sind, desto gestreckter ist der Verlauf. Das Fließgewässer hat aufgrund diverser Einschränkungen wenig Möglichkeit, seitlich auszuweichen und Flussschlingen zu bilden. Es kann eine Abschätzung über die vorherrschend freie, eingeschränkte oder verhinderte Linienführung und das vorhandene Verlagerungspotenzial eines FG getroffen werden. Deswegen wird die Laufentwicklung auch als Hauptparameter bei der Kartierung und Bewertung der Gewässerstrukturgüte verwendet (Tab. 5-5), hier wird der Windungsgrad aber meist nur abgeschätzt und nicht berechnet.

Die Mäandergürtelbreite bezeichnet per Definition den Korridor, der von einem FG langfristig zur eigendynamischen Entwicklung genutzt wird, und entspricht nach diversen Untersuchungen dem 5 bis 20-fachen der Gewässerbreite (vgl. SCHERLE 1999, MADSEN & TENT 2000). Innerhalb des Gürtels liegen also einzelne Mäander, die ihre eigenen Schwingungsbreiten bzw. Amplituden (Mäanderamplitude) ausbilden, was sich am besten über die Abbildung 4-6 verdeutlichen lässt.

Die Wellenlänge, der Mäanderbogen (mittlerer Abstand zwischen zwei gleichsinnigen Flussbiegungen), entspricht etwa der 10 bis 14-fachen Breite, die Bogenlänge einer Mäanderschleife (die Länge des Bogens bis zum Wendepunkt) dementsprechend misst etwa die Hälfte, also das 5 bis 7-fache der Gerinnebreite (MADSEN & TENT 2000). Eine Abschätzung, wie viele Mäanderbögen entlang eines Abschnittes vorkommen oder natürlicherweise vorhanden sein sollten, kann letztendlich auch Auskunft über die Anzahl der Prall- und Gleithänge am FG geben. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf die Anzahl von Riffles und Pools ziehen, da pro Mäander je zwei Riffles und zwei Pools auftreten. Es treten jedoch auch in windungsärmeren FG Unebenheiten der Gewässersohle auf.

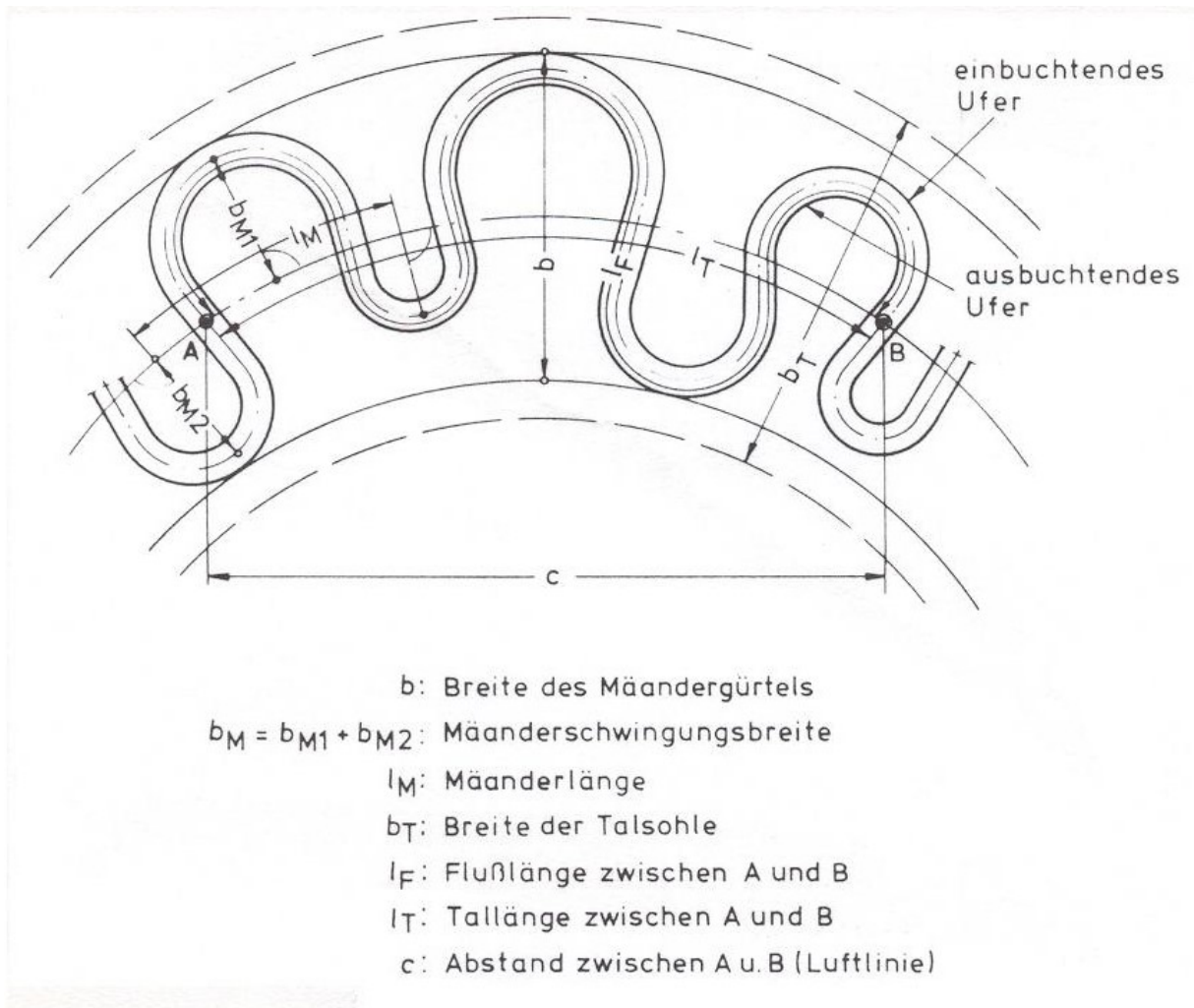


Abb. 5-6: Maßbezeichnungen zur Linienführung nach DIN 4049 (MANGELSDORF & SCHEURMANN 1980, S. 108).

Alle Größen, mit denen die Linienführung und mit ihr in Verbindung stehende Parameter erfasst werden, geben letztendlich Aufschluss über den Zustand eines FG bzw. konkret, inwieweit der Gerinnegrundriss des OHB (von den in vielen Naturdaten und Experimenten gesammelten Beziehungen) vom „Idealtypus“ eines natürlichen Gewässers abweicht.

Mit den dimensionslosen Werten:

$$Y = \frac{B}{T} \text{ und } Z = \frac{T}{dm}$$

- mit
- Y: Verhältnis von Flussbreite und Abflusstiefe
 - Z: Verhältnis von Abflusstiefe zu charakteristischer Korndurchmesser
 - B: Flussbreite, mit $B = B_{BV}$
 - T: Abflusstiefe (bordvoll), mit $T = T_M$
 - dm: charakteristischer Korndurchmesser, $dm \approx d_{50}$

können nach DA SILVA (1991), YALIN und DA SILVA (2001) bzw. ZARN (1997) erwartete Gerinneformen abgeschätzt werden (Abb. 5-7, vgl. ANDERSON et al. 1975, PARKER 1976 in MARTI 2006, JÄGGI 1979).

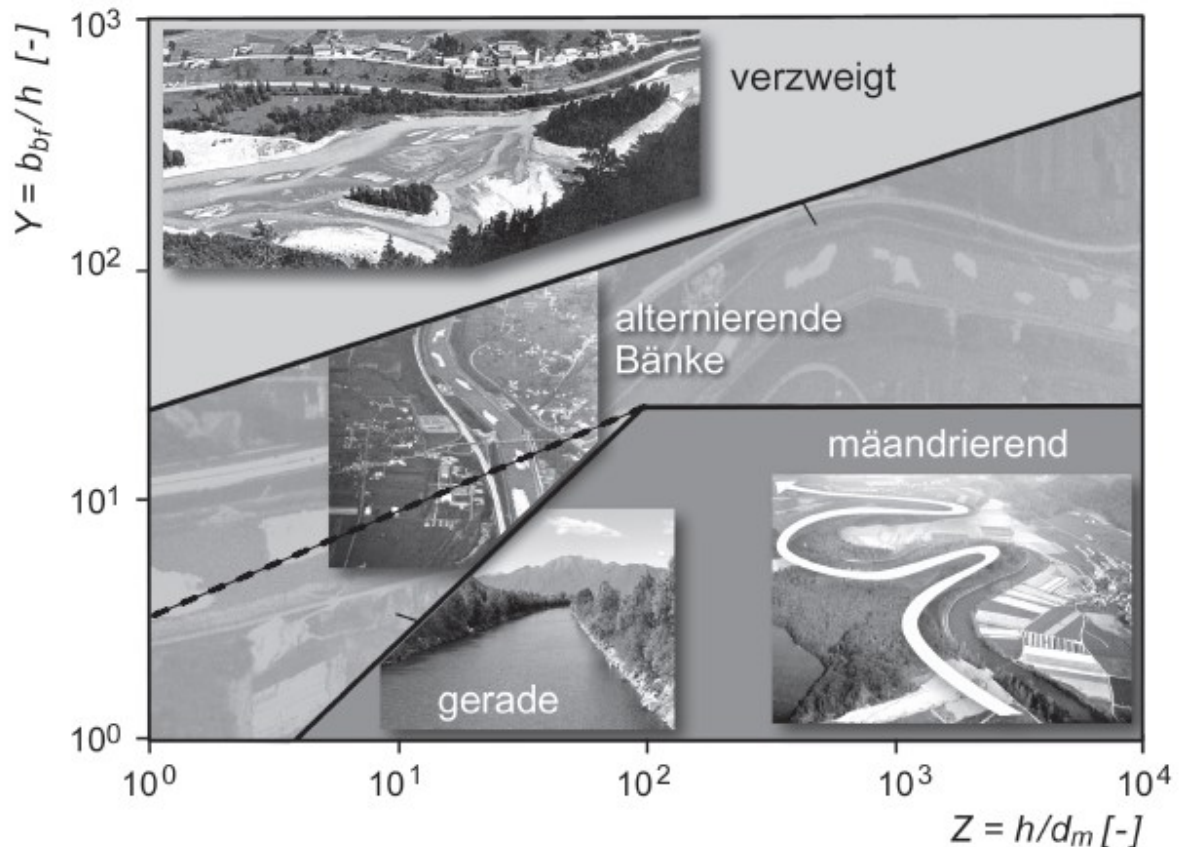


Abb. 5-7: Abgrenzungskriterien nach DA SILVA (1991) und der Modifikation nach ZARN (1997) mit Beispielen charakteristischer Flussabschnitte (REQUENA 2008, S.31).

Gemäß den Parametern von DA SILVA (1991) sind die auftretenden Gerinneformen stark von der Abflussmenge beeinflusst. Wie REQUENA (2008) anmerkt, besteht ein Unterschied im Erscheinungsbild eines Flusses zwischen einer Hochwassersituation und den Verhältnissen bei Niedrigwasser. Gerade bei Hochwasser kann das Verhältnis zwischen Breite und Tiefe so weit abnehmen, dass Teilgerinne zu einer gemeinsamen Wasserfläche verschmelzen, indem niedrige Kiesinseln überflutet werden.

Für die Abschätzung der Gerinneformen in dieser Arbeit wurde nur die bordvolle Abflusssituation für die 33 QPs der Aufnahmen 1 und 5 herangezogen. Für den maßgebenden (charakteristischen) Korndurchmesser d_m wurde der mittlere Korndurchmesser d_{50} ermittelt. Dazu wurde die Kornverteilung aus drei Proben vom 21.07.2011 (ÖF 1) und aus vier Proben vom 21.12.2012 (zwischen der ÖF 6 und ÖF 7) über den Siebdurchgang im Trockensiebverfahren ermittelt.

5.2.2 Gewässerstrukturkartierung

5.2.2.1. Kartierung von Strukturelementen

Die nächste Ebene in der Betrachtung stellt die Strukturkartierung dar. Die erste Gewässerstrukturkartierung bzw. „Habitatkartierung“ für den Neubauabschnitt (vgl. Kapitel 4.2.2.1 und Neubaustrecke im Abschnitt 1 und 2 Abb. 3-13; „Trogbrücke bis südlich Albenschüttweiher“) wurde einen Tag vor der Testausleitung am 08.06.2010 mit einem dGPS durchgeführt (Thales Magellan-Mobile Mapper CE). Dabei wurde ein nach morphologischen Gesichtspunkten ausgerichtetes Verfahren in Anlehnung an die flächendeckende Habitatkartierung von BARTH und GUMPINGER (2008) verwendet, streng genommen wurden also Physiotope bzw. Ökotope kartiert (vgl. NEEF 1968 in WULF 2001). Zur Diskussion des „Habitat“-Begriffs und anderer Bezeichnungen sowie ihrer Abgrenzungen sei auf WULF (2001) und Eichler (2005) verwiesen. Bei genannter Kartierung wurden die „instream structures“ (JUNGWIRTH et al. 2003, RONI 2005), also die verhältnismäßig großen ($> 1 \text{ m}^2$) Strukturen bzw. Strukturelemente im Bachbett, erfasst. Eine Unterscheidung zwischen biotischen und abiotischen Strukturen sowie natürlichen und anthropogenen Elementen wurde nachträglich vorgenommen. Alle Strukturen sind im hierarchischen System den Systemkomponenten des Meso- und Mikrohabitats (Kapitel 3, Abb. 3-2) zuzurechnen (vgl. FRISSELL et al. 1986, KERN 1994). Eine natürliche, differenzierte Strukturausstattung im Gewässer zählt zu den Schlüsselfaktoren für Biozönosen (JUNGWIRTH et al. 2003, RONI 2005, MÜHLMANN 2005).

In Anlehnung an das vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft entwickelte Klassifikations- und Bewertungsverfahren (BAYLFW 2002) wurde eine zweite Aufnahme im Frühjahr 2011 von ADELKOFER (2012) getätigt und eine Gewässerstrukturkartierung im klassischen Sinne vorgenommen. Zu den sonst üblichen Aufnahmen der damals 21 Einzelparameter (heute meist 25, siehe Tab. 5-5) wurde zusätzlich eine Physiotoptop- bzw. Ökotoptopkartierung wie bei der Erstaufnahme durchgeführt. Künftig wird wohl ein zusätzlicher Einzelparameter zur Ablagerung von Feinmaterial im Kieslückensystem (Kolamtion) bei den Kartierungen, die im Rahmen der WRRL durchgeführt werden, mit erfasst werden (FOEKLER & SCHMIDT 2014). Die Rohdaten dieser Aufnahme (ADELKOFER 2012) wurden für eine direkte Vergleichbarkeit mit der Erstaufnahme entsprechend nachbearbeitet.

Tab. 5-5: Bei einer Kartierung nach dem Vor-Ort-Verfahren aufzunehmende Einzelparameter und übergeordnete Ebenen für kleine bis mittelgroße Fließgewässer nach Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2000). Hervorgehoben (fett) sind die Einzelparameter, die auch für die Berichterstattung nach der EU-WRRRL verwendet werden (BMU 2013B, S. 40).

Bereich	Hauptparameter	funktionale Einheit	Einzelparameter
Sohle	Laufentwicklung	Krümmung	Laufkrümmung
			Längsbänke
			besondere Laufstruktur
		Beweglichkeit	Krümmungserosion
			Profiltiefe
			Uferverbau
	Längsprofil	natürliche Längsprofilelemente	Querbänke
			Strömungsdiversität
			Tiefenvarianz
		antropogene Wanderbarrieren	Querbauwerk
			Verrohrungen
Durchlässe			
Sohlenstruktur	Art und Verteilung der Substrate	Rückstau	
		Substrattyp	
	Sohlverbau	Substratdiversität	
		besondere Sohlstrukturen	
Ufer	Querprofil	Profiltiefe	Profiltiefe
		Breitenentwicklung	Breitenerosion
		Breitenvarianz	
	Uferstruktur	Profilform	Profilform
		naturraumtypische Ausprägung	besondere Uferstrukturen
		naturraumtypischer Bewuchs	Uferbewuchs
		Uferverbau	Uferverbau
Land	Gewässerumfeld	Gewässerrandstreifen	Gewässerrandstreifen
		Vorland	Flächennutzung sonstige Umfeldstrukturen

5.2.2.2. Alternative Methode: UAV-Befliegung

Gerät und Feldarbeit

Ein neues Verfahren, Strukturmerkmale zu erfassen, stellt die Erfassung aus der Luft dar. Zur Aufnahme der Testflächen wurde ein „unmanned aircraft vehicle“ (UAV bzw. inkl. der Bodensteuerungseinheit auch als „unmanned aircraft system“, UAS bezeichnet) eingesetzt, das erst gegen Ende der Projektlaufzeit angeschafft wurde. Die Befliegung ausgewählter Standorte erfolgte mittels des „AscTec Falcon 8“ (Ascending Technologies), einem Oktokopter mit integriertem GPS und IMU (Inertial Measurement Unit). Mit einer integrierten Systemkamera (Sony Nex-5) können aus der Luft Fotos aufgenommen werden. UAVs sind durch die schnelle Einsatzbereitschaft, die geringen Kosten und die Möglichkeit, auch auf kleinsten Räumen und in niedrigen Flughöhen operieren zu können, gegenüber der klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie im Vorteil. Durch programmierte Flugpläne können Untersuchungsflächen auch wiederholt erfasst und die Datengewinnung optimiert werden, da Flugroute und Flughöhe und damit auch die gewünschte Bildauflösung zuvor

festgelegt werden können. Der Einsatz von UAVs verzeichnet in den letzten Jahren aufgrund der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten ein stark wachsendes Interesse (u.a. NEITZEL & KLONOWSKI 2011, RAU et al. 2011, ELTNER 2013, D'OLEIRE-OLTMANN et al. 2014, WOODGET et al. 2015).

Tab. 5-6: AscTec Falcon 8 und Sony Nex-5, (Herstellerangaben Ascending Technologies ASC TEC 2015).

Modellbezeichnung	AscTec Falcon 8
Rotordurchmesser:	8" (~ 20 cm)
Leergewicht:	980 g
Max. Abfluggewicht:	2,2 kg
Flugzeit inkl. Nutzlast:	12–22 Min.
Max. Reichweite:	1 km
Windlast:	15 m/s
Maximale Geschwindigkeit:	16 m/s
Modellbezeichnung	Sony Nex-5
Anzahl Pixel	14,2 Mio.
Auflösung/Bildgröße	4592 × 3056
Objektiv	E 16mm, F 2,8, Pancake

Die ersten Befliegungen wurden zum Teil ohne und die weiteren dann mit Flugplan durchgeführt. Mittels Flugplan können Flughöhe und damit die Bodenauflösung, Überlappung zwischen den Fotos und die Anzahl der Fotos festgelegt werden. Nur mit einer entsprechenden Überlappung können die Fotos später in einer entsprechenden Software (Agisoft PhotoScan) auch entsprechend zusammengefügt werden. Erst nach sorgfältiger Planung kann mit zufriedenstellenden Ergebnissen gerechnet werden.

Die Befliegung mit einem erstellten Flugplan ist bei ausreichendem Satellitenempfang theoretisch einfach. Nach dem Exkurs zur Positionsbestimmung mit Satellitensystemen im Auwald ist klar, dass mit einigen Schwierigkeiten – neben dem Sichtkontakt zum Flugobjekt – bei der Durchführung von Befliegungen im Wald zu rechnen ist.

Für die Aufnahme vom 22.11.2014 am Standort „Wegekreuzung“ wurde in einer Höhe von 70 m geflogen, mit einer Überlappung von 60 %. Zur Referenzierung wurden 11 Bodenkontrollpunkte (BKP) mit dem GS09 GNSS eingemessen.

Auswertung

Auf eine Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte und ausführliche Darstellung und Diskussion, wie bei den anderen Methoden, wird an dieser Stelle (Fallbeispiel) verzichtet und stattdessen auf ausgewählte Literatur und aktuelle Arbeiten verwiesen (KERSTEN et al. 2012, RAU et al. 2011, ELTNER 2013, WEGNER 2014). Eine Übersicht zu den einzelnen Arbeitsschritten kann dem Workflow entnommen werden (Abb. 5-8).

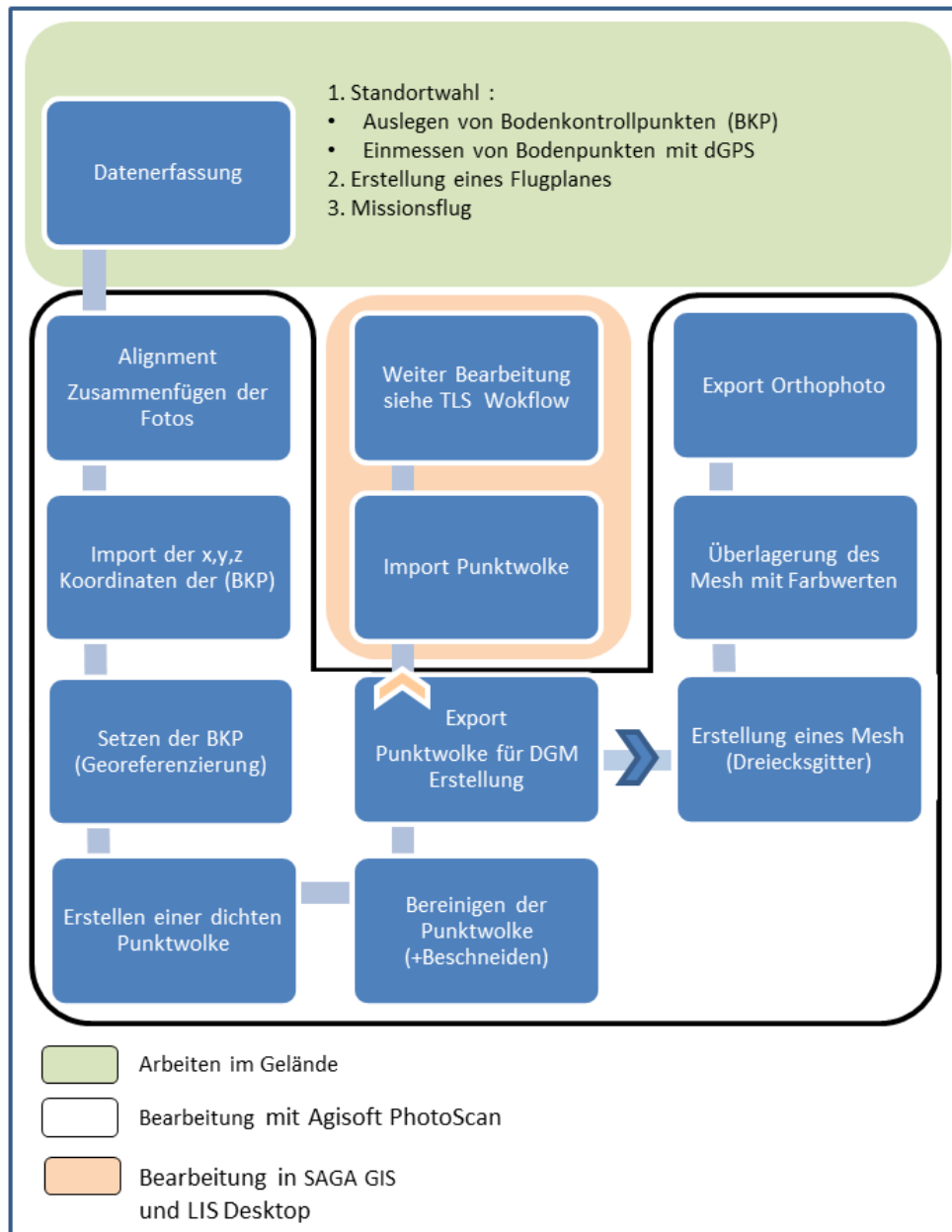


Abb. 5-8: Arbeitsablauf zur Bearbeitung der Luftbilder aus der UAV-Befliegung.

Die Fallstudie soll anhand der Kartierung von Totholzstrukturen – das wesentliche Strukturelement im OHB – den Einsatz und die Möglichkeiten von hochaufgelösten Luftbildern bei der Gewässerstrukturkartierung zeigen.

5.2.2.3. Vermessung von Riffles und Pools

Zur Charakterisierung des Längsverlaufes der Gewässersohle wurden die Riffle-Pool-Sequenzen erhoben. Bei der oben angesprochenen Kartierung der Strukturelemente (am 08.06.2010) wurden insbesondere auch die naturnah angelegten Kolke (Pools) in ihrer Ausdehnung mit einer Messlatte (Länge, Breite (in 0,5 m-Schritten) und Tiefe (in dm-

Genauigkeit)) vermessen (Abb. 5-9, rechts). Da durch das Hochwasser (über Rückstauprozesse und einen gestiegenen Grundwasserspiegel) die tieferen Bereiche im Gerinneverlauf bereits mit Wasser verfüllt waren, ließen sich bei dieser Aufnahme besonders die Pools von der restlichen Gewässersohle leicht abgrenzen. Die Kolkiefen wurden im Bezug auf die umgebende Gerinnesohlhöhe gemessen. Damit wurde in Anlehnung an LISLE (1987) und MOSSOP und BRADFORD (2006 in BRUNKE et al. 2012) die „residual pool depth“ (Restkolktiefe) gemessen, die sich auf die Tiefe eines Kolkes bezieht, wenn kein Abfluss vorliegt (Abb. 5-9). Eine Abgrenzung von künftigen Riffles erschien zum Aufnahmezeitpunkt problematisch, da Prognosen über einen künftigen Wasserstand nur mit Fehleinschätzungen behaftet sein können. Trotzdem wurden bei dieser Aufnahme die, im Vergleich zur restlichen Höhenlage der Gerinnesohle und den tiefer liegenden Pools (mit Wasser), deutlich höheren (trockenen) Abschnitte als Riffles klassifiziert.



Abb. 5-9: Riffles und Pools im Neubauabschnitt des Ottheinrichbaches. Links: Riffle im Vordergrund mit anschließendem Pool an einem angelegten Prallhang (Foto: Peter Fischer, 2010). Rechts: Vermessung eines Pools am QP Nr. 21 (Foto: Martin Kuba, 2010).

Während einer Phase mit reduzierter Ausleitungsmenge ($1,0 \text{ m}^3/\text{s}$) am 26.07.2012 wurden die maximalen Wassertiefen, und damit auch die Sohltopographie durch Messlattenmessungen in 2-3 m Abschnitten erfasst. Dabei wurde durch Abschreiten der Gewässersohle entlang des Talwegs bei 776 Einzelmessungen über eine Länge von etwa 2020 m jeweils lotrecht von der Sohle bis zur Wasseroberfläche gemessen. Die Gewässersohle und die Abfolge von Riffles und Pools wurden damit erfasst (vgl. GURNELL & GREGORY 1995). Zusätzlich wurden die eindeutig zu identifizierenden Kolke (Pools) wieder grob mit einer Messlatte vermessen. Mit diesen Aufnahmen ist zwar keine detailgenaue Dokumentation gewährleistet, aber dennoch konnte eine Beobachtung von Struktur und Entwicklung der gesamten Gewässersohle im Längsprofil auf schnelle Weise erfolgen, da die markanten Pools mit erfasst wurden.

Mit zunehmendem Differenzierungsgrad wächst auch bei Sohlformen der Anspruch einer objektiven Abgrenzung und VETTER (2008) nennt deshalb verschiedene Autoren (z.B. LISLE 1987, O'NEILL & ABRAHAMS 1984, RICHARDS 1976A), die Verfahren zur Abgrenzung von Riffles und Pools vorschlagen. VETTER (2008) bezeichnet dabei das „Zeroline-Verfahren“ nach RICHARDS (1976A) als praktikablen Weg. Eine über Regression bestimmte Höhenreferenzlinie wird benutzt, um darüber liegende Sohlabschnitte als Riffles und darunter

gelegene als Pools voneinander abzugrenzen. Wie bei VETTER (2008) wurde auch in vorliegender Arbeit eine polynomiale Regressionslinie erster Ordnung gewählt, die identisch mit der Linie der mittleren Wassertiefen ist (Abb. 5-10).

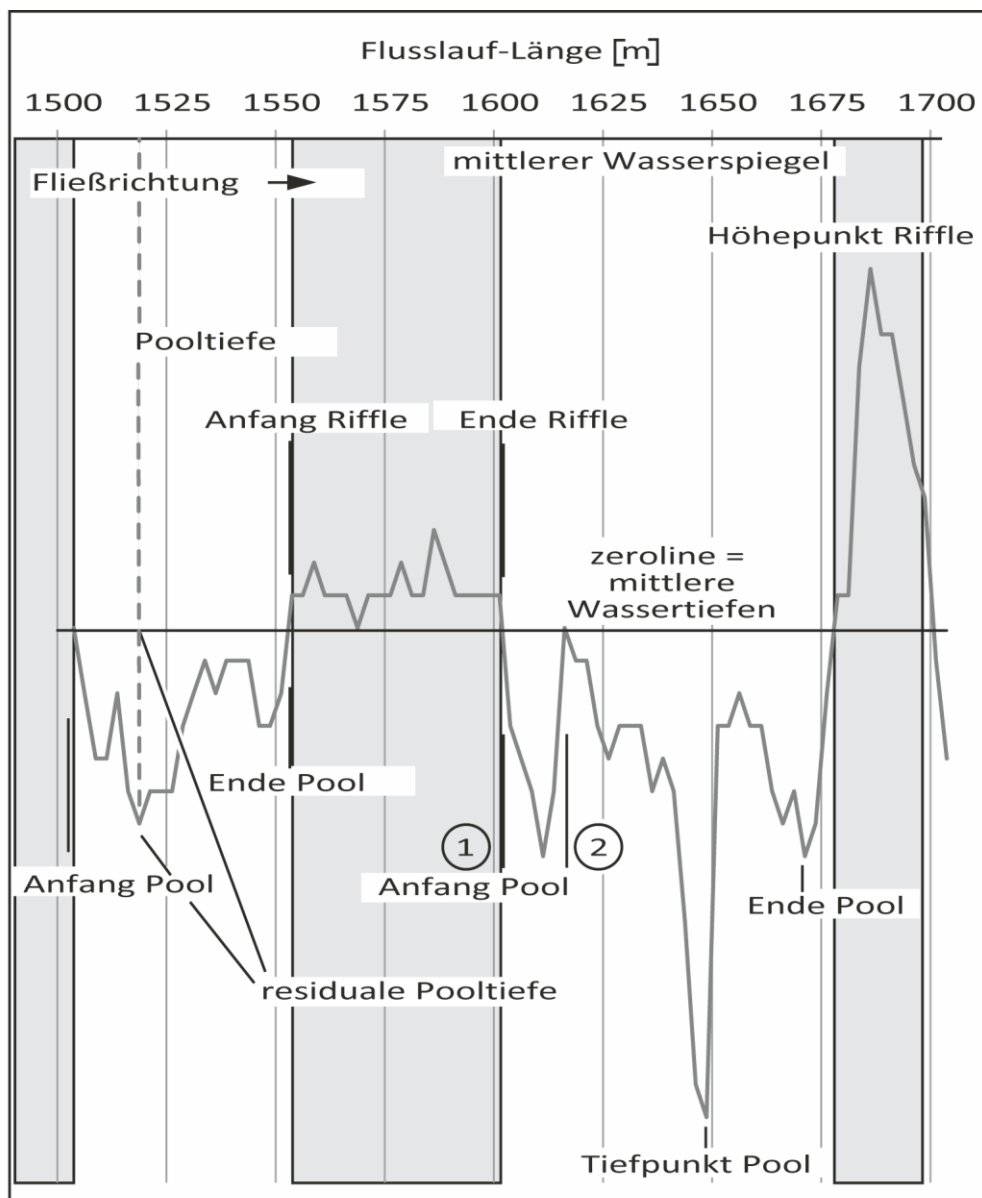


Abb. 5-10: Schema zur Bestimmung der Riffle-Pool-Abfolgen am Laufabschnitt des OHB zwischen 1.500 m und 1.700 m Flusslauf-Länge. Die Unterscheidung zwischen Pooltiefe und Restkolktiefe findet in Anlehnung an RICHARDS (1976A) bzw. VETTER (2008) statt.

Zur Charakterisierung des Längsverlaufes werden die aufgenommenen Riffles und Pools innerhalb des kartierten Flussverlaufes näher betrachtet. Die Riffle-Pool-Frequenz wird als Anzahl pro 100 m angegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Gefällesituation wurde der in Kapitel 4.2.2 vorgestellte Abschnitt (Teilabschnitt 1.2, Abb. 4-13) nach der „Trogbrücke“ (Beckenpass) getrennt ausgewertet. Je nach Auswertung kann sich eine unterschiedliche Anzahl ergeben, z. B. wenn der Bereich zwischen 1 und 2 in der Abbildung 4-9 als eigenständiger Pool gezählt wird. Das Verhältnis der Riffle-Pool-Abfolgen kann die

morphologische Heterogenität eines Gerinnes beschreiben (GURNELL & GREGORY 1995, BARBOUR et al. 1999).

5.2.3 Querprofilvermessung

Die klassische Methode und sicher auch eine der ältesten in der Flusskunde ist die Querprofilvermessung, sie liefert eine unverzichtbare Grundlage für hydraulische und morphologische Berechnungen (KNIGHTON 1998, KAHMEN 2005, RONI 2005, LFU 2008B). Trotzdem lassen sich erstaunlich wenige Arbeiten zu einer detaillierten Analyse – vor allem im geomorphologischen Sinne – finden, meist endet die Auswertung bei einer einfachen Darstellung der hydrographischen Vermessung eines sich verändernden Flussquerschnitts. Für eine Charakterisierung allerdings kann nach KNIGHTON (1998) in Variablen, die die Dimension oder die Form beschreiben, unterschieden werden. Die QP-Vermessung wurde als Ergänzung zum TLS herangezogen, um auch die Bereiche unterhalb des Wasserspiegels zu erfassen, an denen keine Vermessung mit dem verwendeten Laserscanner möglich war (Absorption der Laserstrahlen, Kapitel 5.2.4). Hierzu wurden auch Erosions- und Akkumulationsbereiche (2D) berechnet. Zudem lassen sich aus den QP-Daten und einem Rauigkeitskoeffizienten n die mittlere Fließgeschwindigkeit und der bordvolle Abfluss berechnen, wie es bereits in Kapitel 5.1.2.2 erläutert wurde (GRAF & ALTINAKAR 2003, GORDON et al. 2013).

5.2.3.1. Feldarbeiten

An 33 ausgewählten Standorten, die möglichst die ganze Vielfalt an unterschiedlichen Gerinnebettmustern und Gerinnequerschnitten (Prallhänge, Kiesbänke, gerade Fließstrecken, Pools, unterschiedliche Ufersubstrate und Ufervegetation) repräsentieren, wurden in der Regel fünf Aufnahmen (Tab. 5-7) mit einem Nivellier (Sprinter 24) gemacht. Die Lage der Standorte ist der Abbildung 5-11 zu entnehmen.

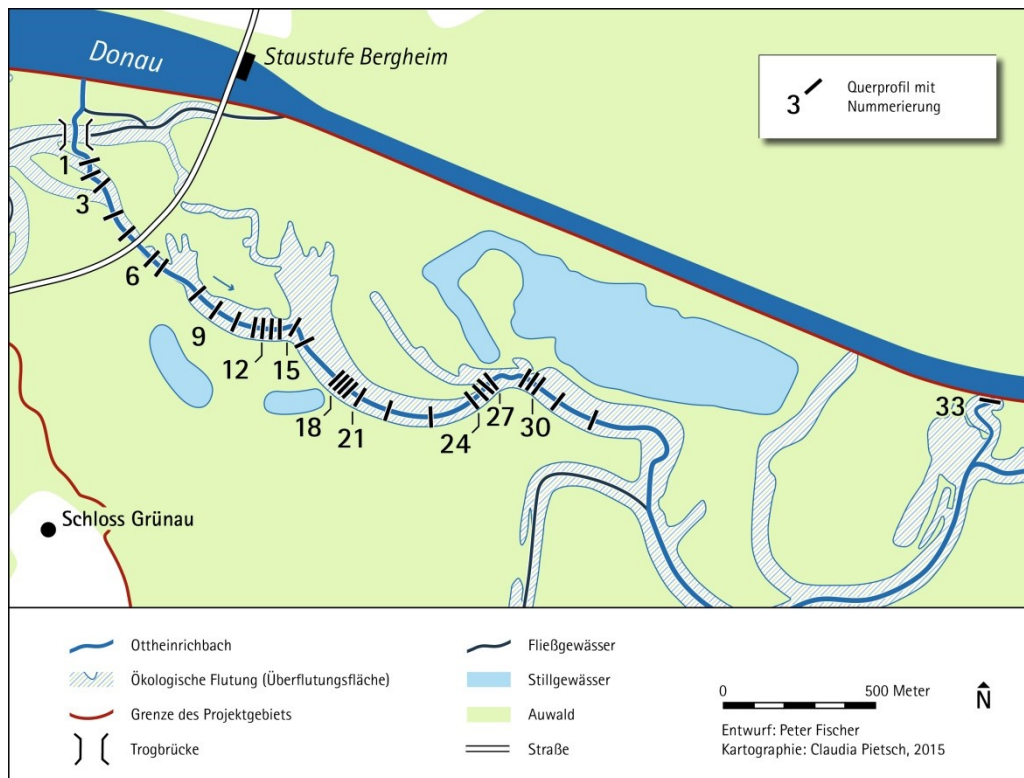


Abb. 5-11: Lage der Querprofile im Untersuchungsgebiet.

An den ausgewählten Gerinnequerschnitten wurden an beiden Ufern Holzpfosten eingeschlagen, die die Anfangs- und Endpunkte der Messachse darstellen. Um Profile verschiedener Zeitpunkte miteinander vergleichen zu können, wurde bei jeder Aufnahme der Instrumentenhorizont, bezogen auf einen der Pfosten, mit eingemessen – wenn dieser noch vorhanden war. Leider kam es immer wieder vor, dass diese als „vermisst oder verschollen“ verzeichnet werden mussten und dann über zeitaufwändige Rekonstruktion versucht wurde, den Standpunkt über ältere Aufnahmen wieder zu finden.

Tab. 5-7: Aufnahmen zur Querprofilvermessung.

Aufnahmen	Aufnahmezeitpunkt	Bezeichnung in der Datenbank
1. Aufnahme	Mai 2010	A
2. Aufnahme	Februar 2011	B
3. Aufnahme	August 2011	C
4. Aufnahme	April 2012	D
5. Aufnahme	Oktober 2013	E
zusätzliche Aufnahme	z.B. September 2011	z. B. C2

Je nach topographischer Ausprägung wurde alle 50 cm bzw. bei markanten Höhenunterschieden im Gerinne oder bei steilen Ufern alle 25 cm, selten noch häufiger, Punktmessungen entlang eines Maßbands durchgeführt. Neben der Morphologie ist auch der Wasseranschlagspunkt mit aufgenommen worden, um so den Wasserstand zum Zeitpunkt der Aufnahme mit zu erfassen. Über Sohle und Ufer hinaus wurde noch ein Teil

der sich anschließenden Aue mit erfasst, um einerseits das bordvolle Niveau besser bestimmen zu können, aber auch um für die Holzpflocke erosionsferne Standorte (Standorte, die längerfristig Bestand haben) zu wählen.

5.2.3.2. Auswertung

Für jedes Profil wurden zunächst die Höhenangaben der Einzelpunktmessungen in ein Excel-Datenblatt übertragen und die Punktdaten für eine erste Visualisierung in Linien überführt. Jede Folgeaufnahme wurde entsprechend ergänzt und auf eine gemeinsame QP-Höhe umgerechnet. Hier erfolgte bereits eine Plausibilitätsprüfung der Rohdaten.

Für die Ergebnisdarstellung und Analyse wurden zwei Richtungen eingeschlagen. Für die Darstellung (qualitativ) wurden die zuvor in Excel bearbeiteten QP-Linien letztendlich mit einem Graphikprogramm dargestellt. Die Blickrichtung ist für alle Profile flussabwärts gewählt, in Richtung der angreifenden Fließkräfte. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde hier eine einheitliche (gleiche Skalierung) 2-fach überhöhte Darstellung gewählt.

Für die Berechnung der Veränderung (quantitativ) wurden verschiedene Programme verwendet. Nach einer weiteren Datenvorbereitung in Excel erfolgte der Import in ArcGIS, in dem eine Querprofil-Datenbank erstellt wurde. Hierzu wurde ein Workflow mit dem *Model builder* entwickelt, der für jedes QP die Bestimmung zahlreicher Parameter (morphometrische und hydraulische) ermöglicht. Dimensionsbeschreibende Größen (Gerinnebreite = B , mittlere (T_M) und maximale Gerinnetiefe (T_{MAX}), durchströmte Querschnittsfläche = A , benetzter Umfang = U und hydraulischer Radius = R_{hy}) konnten so aus den aufgenommenen Daten über ArcGIS berechnet werden.

Formbeschreibende Größen sind das Breiten-Tiefen-Verhältnis B/T , ein Verhältnis aus maximaler und mittlerer Tiefe T_{MAX}/T_M und verschiedene Parameter, die die Asymmetrie eines QP widerspiegeln können (KNIGHTON 1998). Zur Berechnung des Breiten-Tiefen-Verhältnisses, manchmal auch als ‚form ratio‘ bezeichnet (GREGORY & WALLING 1973 in GORDON et al. 2013, RICHARDS 1982), kann sowohl die maximale Gerinnetiefe (SCHUMM 1960) als auch die mittlere Gerinnetiefe (GORDON et al. 2013, KNIGHTON 1998) herangezogen werden. Ohne Unterschied welche der beiden Variablen verwendet wird, zeigt ein hoher Wert des berechneten Verhältnisses B/T ein eher breites QP an, wohingegen ein kleiner Wert schmale und eher tief eingeschnittene QP (Dreiecksform) charakterisiert (Abb. 4-12). Eine ausführliche Darstellung zu den jeweiligen Unterschieden findet sich bei HARNISCHMACHER (2002).

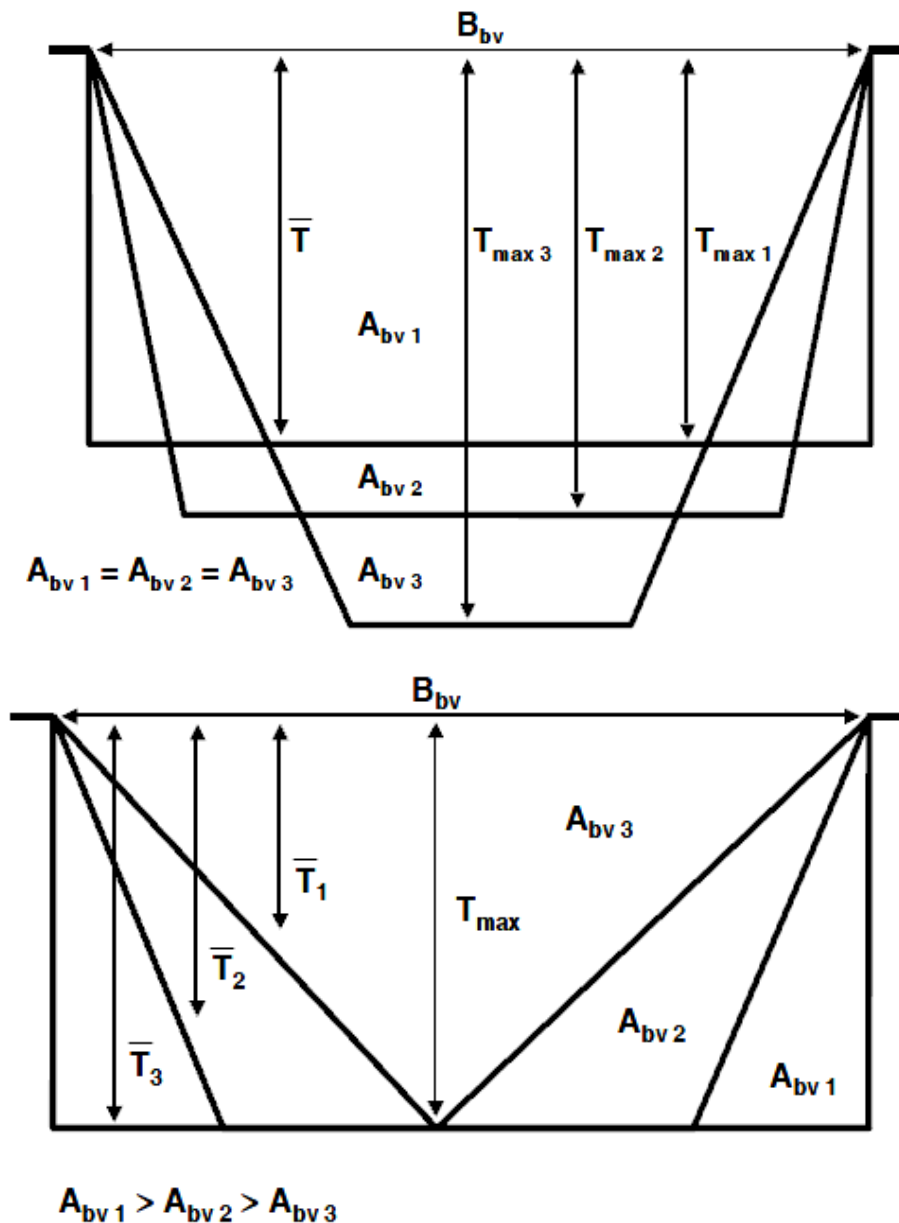


Abb. 5-12: Skizze zum Breiten-Tiefen-Verhältnis mit A = Fläche, B = Breite und T = Tiefe (HARNISCHMACHER 2002, S. 101).

Alle beschreibenden QP-Variablen sollten sich (zwecks besserer Vergleichbarkeit) auf ein einheitliches Bezugsniveau beziehen. Neben einem mittleren Wasserspiegel wurde, wie bei HARNISCHMACHER (2002), das bordvolle Niveau gewählt, welches über die niedrigste Uferkante nach SCHUMM (1960) ermittelt wurde. Die Ermittlung über das kleinste Breiten-Tiefen-Verhältnis (WOLMAN 1955 in HARNISCHMACHER 2002) schien aufgrund der ungleichförmigen Ufer und Uferböschungen mit $< 45^\circ$ für die vorliegenden QP nicht geeignet (WILLIAMS 1978 in HARNISCHMACHER 2002). Zum anderen wurde auch für die Berechnung der Ausbordungsmengen im Grundwasser-Fließgewässer-Simulationsmodell (RMD CONSULT 2004A) der niedrigere der beiden Gerinnenränder verwendet. Zu den unterschiedlichen in der Literatur diskutierten Bestimmungsmöglichkeiten dieser oberen Grenze sei auf die ausführliche Darstellung bei WILLIAMS (1978) und HARNISCHMACHER

(2002) verwiesen. Entsprechend sind die Variablen, die sich auf das bordvolle Niveau beziehen, durch den Zusatz B_V gekennzeichnet. Erosions- und Sedimentationsflächen (2D) die bei der Seitenansicht eines Querprofils entstehen wenn die Profillinie durch die Linie des bordvollen Niveaus geschlossen wird, wurden für die einzelnen Aufnahmen für jeden der 33 Standorte in der ArcGIS Querprofildatenbank berechnet. Die in Kapitel 6 präsentierten Ergebnisse beziehen sich auf die Aufnahmen 1 und 5 (bzw. erste und bisher letzte Aufnahme) sowie die Veränderung zwischen diesen.

Über die Quotienten von B/B_{BV} und T_{MAX}/T_{MAX-BV} und die Verhältniszahl konnte die Veränderung zu unterschiedlichen Wasserständen herausgestellt werden. Diese beiden Verhältnisse können als Maß für die Ausuferungskapazität herangezogen werden (HARNISCHMACHER 2002), zum anderen lassen sich Aussagen über die Steilheit der Ufer treffen. Ein kleiner Wert zeigt in der Regel schon bei mittlerem Abfluss einen hohen Wasserstand im Gerinne und damit auch eine hohe Ausuferungskapazität an, während große Werte eher Bereiche kennzeichnen, in denen das Gerinne stark eingetieft ist und eine geringe Ausuferungskapazität gegeben ist. Bezugnehmend auf eine Sekundärauenentwicklung sind ebenfalls Rückschlüsse aus diesem Verhältnis zu ziehen.

Ein eng damit in Verbindung stehender Ansatz ist das von ROSGEN (1994) entwickelte Eintiefungsverhältnis (entrenchment ratio). Mit dieser Maßzahl wird deutlich, wie tief ein Gewässer eingeschnitten ist oder ob es noch innerhalb der Auenfläche liegt (Abb. 5-13). Indirekt kann nach SCHERLE (1999) damit auch die hydraulische Belastung des Gewässerbettes bei Hochwasser und eine Häufigkeit der Auenüberflutung abgeleitet werden. Zur Bestimmung der Überflutungsbreite wird die Wassertiefe bei zweifachem bordvollem Abfluss im Bereich einer Furt verwendet. Diese so ermittelte Breite bei Überflutungen wird ins Verhältnis zur bordvollen Breite gesetzt. Als Beispiel für die Berechnung wird das QP an der „Wegekreuzung“, welches einer Furt ähnelt, herangezogen. Zur Berechnung wurde aus dem DGM ein Profil abgeleitet.

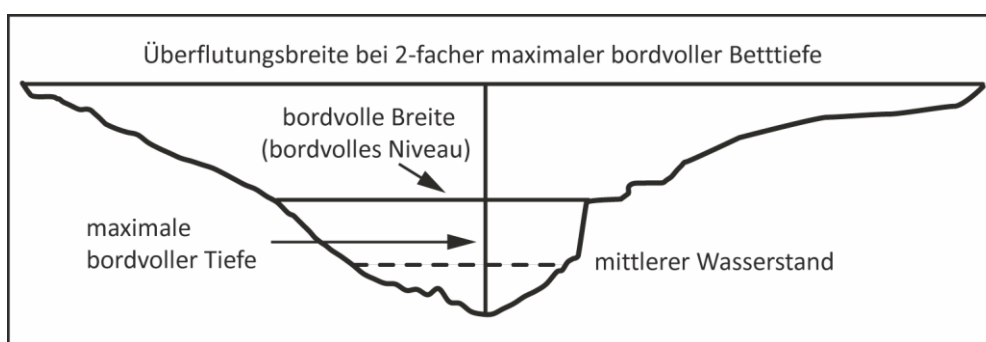


Abb. 5-13: Skizze zur Bestimmung des bordvollen Niveaus und des Eintiefungsverhältnisses nach ROSGEN (1994, S.182, vgl. SCHERLE 1999, S. 2-37).

Abschließend wurde nach der Berechnung der genannten Größen aus den QP-Daten für alle Querprofile im Neubauabschnitt das Minimum und Maximum, Mittelwert und Median, Standardabweichung und der jeweilige Variationskoeffizient berechnet. Die berechneten Kennwerte sind im Ergebnisteil in den diversen Tabellen dargestellt. Einen Überblick über

die morphometrischen Parameter der Querprofilvermessung und Auswertung gibt an dieser Stelle Tabelle 5-8.

Tab. 5-8: Übersicht über die berechneten morphometrischen Parameter (wenn nicht anders benannt (MW= Mittelwasser), beziehen sich alle Angaben auf das bordvolle Niveau)

Parameter	Bestimmung	Formel
Gefälle	Berechnet aus Planungsunterlagen Bestimmt aus Vermessungsdaten	$I = [m/1000m]$
Krümmungsradius	Aus TLS- Aufnahme und Luftbildern, Radius eines Kreissegments zwischen zwei QP	$rKr = [m]$
Dimensionsbeschreibende Größen		
Mittlere Tiefe	Mittelwert aus allen Messlotrechten	$T_M = [m]$
Maximale Tiefe	Maximalwert der Messlotrechten	$T_{MAX} = [m]$
Querprofilbreite	Wasserspiegelbreite, benetzte Gerinnebreite	$B = [m]$
Querschnittsfläche	Produkt aus mittlerer Tiefe und Breite	$A = T_{MITTEL} * B [m^2]$
Benetzter Umfang	Umfang der benetzten Querschnittsfläche	$U = A/R_{hy} [m]$
Hydraulischer Radius	Quotient aus Fließquerschnitt und benetztem Umfang	$R_{hy} = A/U [m]$
Formbeschreibende Größen		
Breiten-Tiefen-Verhältnis 1	Quotient aus Breite und mittlerer Tiefe	$B/T = B/T_{MITTEL}$
Breiten-Tiefen-Verhältnis 2	Quotient aus Breite und maximaler Tiefe	$B/T = B/T_{MAX}$
Verhältnis Maße		
Tiefen-Verhältnis 1	Quotient aus maximaler und mittlerer Tiefe	T_{MAX}/T_{MITTEL}
Tiefen-Verhältnis 2	Quotient der Tiefen	T_{MAX-MW}/T_{MAX}
Breiten-Verhältnis	Quotient der Breiten	B_{MW}/B_{BV}
Eintiefungsverhältnis	Quotient der Breiten	$B_{bei 2} * T_{MAX}/B$

Auf die Darstellung der einzelnen Gerinnequerprofile entlang des Flussverlaufes wird verzichtet, stattdessen lassen sich über die Kontinuitätsgleichung die berechneten Größen in Beziehung zueinander setzen. Die Korrelation zwischen morphometrischen und hydraulischen Parametern der Gerinnequerschnitte am OHB schließt das Unterkapitel „Querprofilvermessung“ im Ergebnisteil ab.

5.2.4 Terrestrisches Laserscanning

Um die Genese der Lebensräume am UG_{Gew}, aber auch bereits die im Vorfeld ablaufenden fluvial-morphologischen Prozesse in hoher Auflösung zu erfassen, wurde mit ground-based LiDAR (Light Detection And Ranging) gearbeitet.

Einen Schwerpunkt der Arbeit bilden die Aufnahmen mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS), durch die Oberflächenveränderungen (oberhalb des Wasserspiegels) des OHB genau (durchschnittliche Punktdichte von 9 Punkten pro 5 cm²) aufgezeichnet werden können. Das terrestrische Laserscanning als automatisierte Messtechnologie stellt ein sehr leistungsfähiges Vermessungssystem dar. Über ein polares Aufnahmeverfahren, bei dem jeder Punkt an der Oberfläche eines Objekts durch Messung von Horizontal- und Vertikalrichtung sowie der Strecke dreidimensional erfasst wird, entsteht ein 3D-Abbild der gescannten Oberfläche in Form einer Punktwolke (KERN 2003, KRAUS 2004, VOSSELMAN & MAAS 2010, KOHLSTOCK 2011). Über die untenstehende Gleichung lässt sich dann auch die Entfernung der Objekte vom Laserscanner berechnen:

$$Distance = (Speed\ of\ Light \times Time\ of\ Flight)/2$$

5.2.4.1. Gerät und Feldarbeiten

Gerät

Eingesetzt wurde der an der KU Eichstätt-Ingolstadt zur Verfügung stehende Laserscanner (Riegel, LMS 420i) mit den Kameras Canon 350 D und Nikon D700. Das eingesetzte System, Scanner (Impulslaufzeitverfahren, nahes Infrarot) und Kamera, bietet gegenüber getrennten Lösungen verschiedene Vorteile (siehe hierzu MULSOW et al. 2004, KIENAST & HARING 2006, SCHNEIDER & MAAS 2007) und vereint ein weites Sichtfeld mit hohen Reichweiten. Zu technischen Angaben, die über die Tabelle 5-9 hinausgehen, zur Funktionsweise des Systems sowie zum Aufbau der Scannereinheit, sei auf entsprechende Literatur (KERN 2003, KRAUS 2004, KIENAST & HARING 2006, VOSSELMAN & MAAS 2010) und die Angaben des Herstellers (vgl. RIEGL O. J., 2010) verwiesen.

Tab. 5-9: Eigenschaften des Vermessungssystems 3D Terrestrischer Laserscanner (LMS-Z420i) und Digitalkamera mit Objektiv (KRAUS 2007, und Herstellerangaben (RIEGL 2010, CANON 2015, NIKON 2015).

Modellbezeichnung	Riegl LMS-Z420i
Reichweite	2 bis 1000 m, je nach Zielreflektivität 10%: 350 m, 80%: 1000 m
Scanbereich horizontal/vertikal	0° bis 360°/0° bis 80°
Schrittweite horizontal/vertikal	min. 0,008°/ min. 0,01°
Strahldivergenz (IFOV), Winkelabweichung	0,25 mrad „footprint“ ist 2,5 cm bei 100 m
Winkelauflösung horizontal/vertikal	0,0025°/0,002°
Streckenmessgenauigkeit (accuracy)	± 10 mm (Einzelpunktmessung) ± 5 mm (Durchschnitt)
Präzisionsgenauigkeit (repeatability)	± 8mm (Einzelpunktmessung) ± 4mm (Durchschnitt)
Messfrequenz	24 kHz, rotierender Spiegel: bis zu 8.000 pts/sec oszillierender Spiegel: bis zu 11.000 pts/sec
Wellenlänge	nahes Infrarot (1550 nm)
Modellbezeichnung	Canon 350 D/50mm Objektiv
Anzahl Pixel	8 Mio.
Auflösung/Bildgröße	3.456 x 2.304
Anzahl Fotos für 360°	7
Modellbezeichnung	Nikon D700/20mm Objektiv
Anzahl Pixel	12,1 Mio.
Auflösung/Bildgröße	4.256 x 2.832
Anzahl Fotos für 360°	5

Bei der Angabe der Messgenauigkeit oder besser Messunsicherheit (vgl. PFEIFER & SCHMITT 2010) treten die beiden Begriffe „accuracy“ (Grad der Übereinstimmung von gemessenem und wahren bzw. richtigem Wert) und „repeatability“ (Grad der Übereinstimmung bei wiederholter Messung) auf. In der Arbeit erfolgt grundsätzlich eine Orientierung an den in der Metrologie üblichen Begriffen Präzision und Richtigkeit (Abb. 5-14) (KERN 2003). In diesem Zusammenhang soll an dieser Stelle kurz auf die Messunsicherheit und den Messfehler beim TLS eingegangen werden, die zum Teil lebhaft in zahlreichen Beiträgen diskutiert (BOEHLER & MARBS 2004, MULSOW et al. 2004, WEHMANN et al. 2007, WHEATON et al. 2010A, MILAN et al. 2011) und auch in Dissertationen immer wieder angesprochen und behandelt werden (JUTZI 2007, GORDON 2008, RESHETYUK 2009, DOLD 2010).

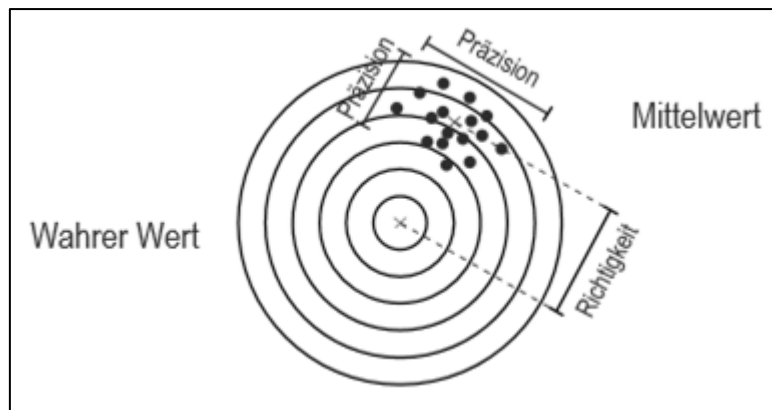


Abb. 5-14: Begriffe zur Beschreibung der Qualität von Messinformationen (KERN & BRUHN 2010, S. 4).

Verschiedenste Faktoren beeinflussen die Messung und können zu verfälschten oder ungenauen Messergebnissen führen. Entscheidend für die räumliche Auflösung oder Punktdichte ist aber zunächst die gewählte Winkelauflösung (resolution) und die Distanz zum betrachteten Objekt (Abb. 5-15). Bei einer Strahldivergenz von 0,25 mrad nimmt der „footprint“ um 2,5 cm pro 100 m zu (RIEGL 2010). Die Strahldivergenz sollte mit der Schrittweite abgestimmt sein, damit es einerseits zu einer größtmöglichen Abdeckung, andererseits nicht zu einer Überlappung der Laserstrahlen kommt (KERN 2003).

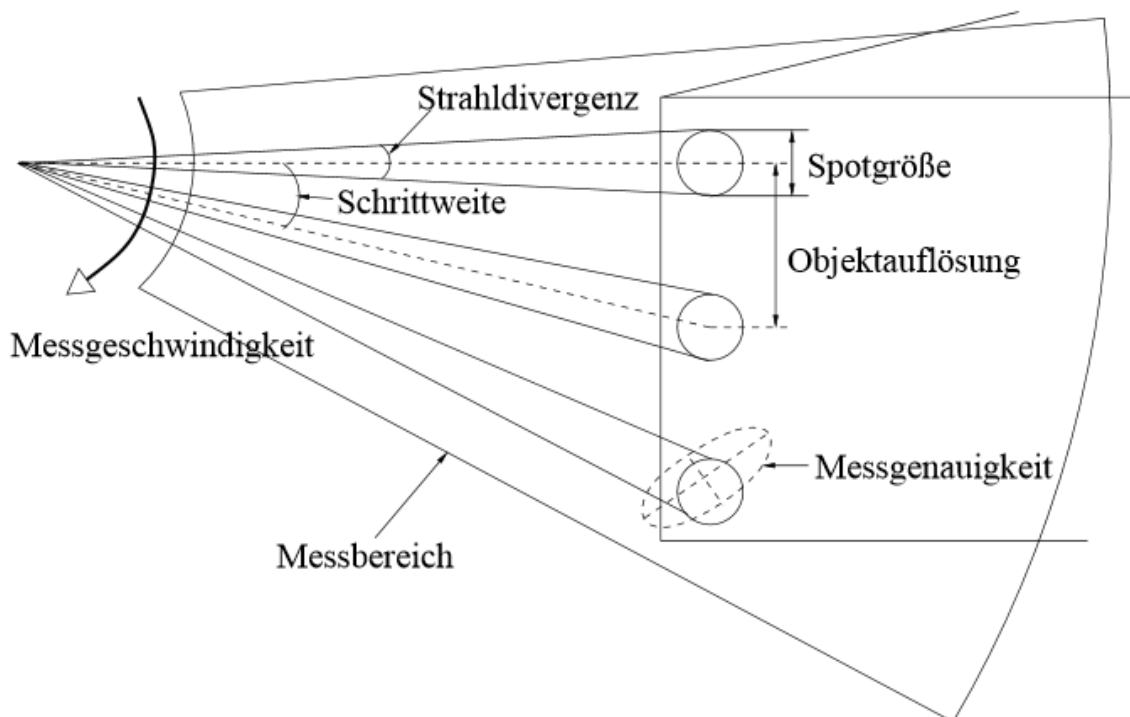


Abb. 5-15: Strahldivergenz, Spotgröße und Schrittweite (KERN 2003, S. 57).

GORDON (2008) unterscheidet bei der Zusammenstellung des „Messunsicherheitsbudgets“ zwischen den „inneren Einflußfaktoren“ im Sinne gerätebedingter, systematischer Einflüsse durch Unzulänglichkeiten des Laserscanmesssystems selbst, wie Abweichungen der Distanzmessung, Achsenabweichungen, Exzentrizitäten und fehlerhaften Kalibrierungen, und „äußerer Einflussfaktoren“, wie atmosphärische Einflüsse, Temperatur, Lichtverhältnisse, Oberflächenfarbe und -beschaffenheit (Rauigkeit) sowie Reflexivität des Untersuchungs-objekts (BOEHLER & MARBS 2004, PFEIFER & SCHMITT 2010).

Bei der berührungslosen Distanzmessung bzw. diversen Fernerkundungsmethoden ist stets eine Abhängigkeit von der Beschaffenheit der zu untersuchenden Oberfläche zu beobachten und zu berücksichtigen. Sowohl die Farbe als auch die Rauigkeit (Oberflächenbeschaffenheit) beeinflusst die Reflexivität des Objektes. Die Farbe bestimmt, welche Frequenzanteile des Lichtes absorbiert und welche reflektiert werden, und an z. B. glatten Oberflächen zeigt sich eine vollständig spiegelnde Reflexion (vgl. DOLD 2010). Die Feuchte des Materials ist ebenso entscheidend für die Reflexionsintensität eines Laserstrahls. Bei Niederschlag sowie bei Nebel können keine zufriedenstellenden Aufnahmen gemacht werden. An dunklen, feuchten und homogenen Oberflächen konnte vom Verfasser teilweise eine Absorption beobachtet werden, die zu Datenlücken in den Aufnahmen führte. Grundsätzlich können bei der Reflexion drei Arten unterschieden werden (vgl. KERN 2003, RIEGL O. J., JUTZI 2007):

- **Diffuse Reflexion:** Ein auf die Objektoberfläche auftreffender Lichtstrahl bzw. das Lichtbündel wird in nahezu alle Richtungen reflektiert.
- **Spiegelreflexion:** Bei der Spiegelreflexion kommt es zu einer fast vollständigen Reflexion des auftreffenden Strahles und es kann auch kein Echo registriert werden.
- **Retroreflexion:** Ein Strahl wird in sich selbst reflektiert.

Möglich sind auch Kombinationen aus den einzelnen Reflexionsarten (KERN 2003, JUTZI 2007). Die Reflexionseigenschaften werden durch den Reflexionskoeffizienten r charakterisiert. Je nach Beschaffenheit des Materials kann r bei einer diffusen Reflexion zwischen 0 und 1 (bzw. 0 %-100 %) betragen (Riegl o. J.).

Besondere Relevanz haben die Reflexionen und Spiegelungen an Wasseroberflächen. Im Grenzbereich zwischen Wasser und Luft ergeben sich verschiedene Effekte, die besondere Berücksichtigung erfordern. Auch in zahlreichen Scanaufnahmen am OHB konnten diese Effekte beobachtet werden. Diese Aufnahmen mussten dann auch entsprechend gesondert behandelt werden.

Feldarbeit

Als Vorbereitung der eigentlichen Scanaufnahmen wurde das frisch angelegte Gerinne noch während der Bauarbeiten begangen und mit Reflektoren bestückt. Die sog. Tiepoints (Reflektoren von 5-10 cm Durchmesser) wurden an Bäumen und, wenn möglich, an Brückenbauwerken o.ä. verschraubt. Diese Passpunkte wurden dann für die spätere Registrierung der einzelnen Scanpositionen und auch, um mehrere Scanpositionen zu einem

Flussabschnitt zusammensetzen, herangezogen. Im Laufe des Untersuchungszeitraumes mussten diese teilweise wieder ersetzt, ausgetauscht oder ergänzt, im besten Fall nur freigeschnitten werden.

In der ersten und sicherlich aufwändigsten Messkampagne (Installation der Tiepoints, Auswählen der Scanpositionen) wurde eine Komplettaufnahme des Gerinnes (Neubauabschnitte) angestrebt.

Auf diese Erstaufnahme aufbauend, konnten im weiteren Projektverlauf durch multi-temporales Einmessen (vor allem nach Hochwasser-/Flutungseignissen) beispielsweise die Erosion von Prallhängen und der Sedimentabtrag an Uferbereichen innerhalb dieser Zeiträume quantifiziert werden. An anderen Stellen wurden auch Ablagerungen und neu entstandene Sandbänke und Kiesinseln oder andere Strukturveränderungen erfasst. An sechs ausgewählten Scanstandorten („Trogbrücke“, „Prallhang Radbrücke“, „Wegekreuzung“, „Prallhang am Querprofil 17-20“, „Wetterloch“ und „1. Rückleitung“, siehe Kapitel 6.2.4.2, Abb. 6.2.-21) wurden Prallhänge oder morphodynamisch besonders aktive Fließstrecken in höherer zeitlicher Auflösung aufgenommen und vermessen.

Um bei der Erfassung an den einzelnen Standorten den Datenverlust aufgrund von Abschattungen möglichst gering zu halten, wurde versucht, möglichst viele Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen zu tätigen (HERITAGE et al. 2009, HAAS et al. 2011, KOHLSTOCK 2011). Durch die langegezogene Form des Untersuchungsobjektes und den etwa 180°-Scanpositionen auf Prall- oder Gleithangstandorten in Verbindung mit den Bäumen (Abschattung und Verdeckung von Reflektoren) war nie ein „einfaches“ Umstellen der Scannereinheit möglich. Abschattungen sind besonders bei Waldstandorten zahlreich, daher mussten stets mehrere Scanpositionen eingerichtet werden, um das Untersuchungsobjekt möglichst lückenlos zu erfassen.

Für die Auflösung (resolution) wurde ein Wert von $0,05^\circ$ gewählt. Damit ist eine ausreichend hohe Punktdichte zu erzielen, und für eine 360°-Scanposition werden so rund 23,5 Min. benötigt. Mit Auf- und Abbau des Systems, „Mounting“ (verschiedene Einstellungen zur Scanvorbereitung), „overview scan“ mit „beamwidening lens“ (zur Orientierung und Reflektorsuche), Fotos vom Standort zur Colorierung, „FineScan“ der Reflektoren (ca. 2000 Punkte pro Reflektor) und dem Freischneiden von Sichtfenstern kann etwa 1 Std. pro Scanposition angesetzt werden.

5.2.4.2. Datenaufbereitung und verwendete Software (Postprocessing)

Nach der Datenerfassung erfolgt der Auswertungsprozess, der sich in die zwei Hauptarbeitsschritte „Registrierung“ und „Modellierung“ aufteilen lässt. Über verschiedene Softwarelösungen (Riscan Pro, SAGA GIS, Applikation SAGA LIS und Arc GIS) wurden die Rohdaten (eine x-y-z Punktwolke, dargestellt als colorierte Punktwolke, z. B. Abb. 5-17) weiterverarbeitet und entweder direkt mit den Punktwolken oder dann mit Grids (Rasterformat), Analysen zur Sedimentverlagerung und Entwicklung des neuen Gewässerbettes getätigt. Zusätzlich wurde für die Scanaufnahmen „im Wald am Wasser“ ein eigener

„Workflow“ entwickelt, da sich hier entgegen den bisherigen Erfahrungen aus Gebirgsregionen (HAAS et al. 2011) neue Herausforderungen ergeben haben (Abb. 5-16).

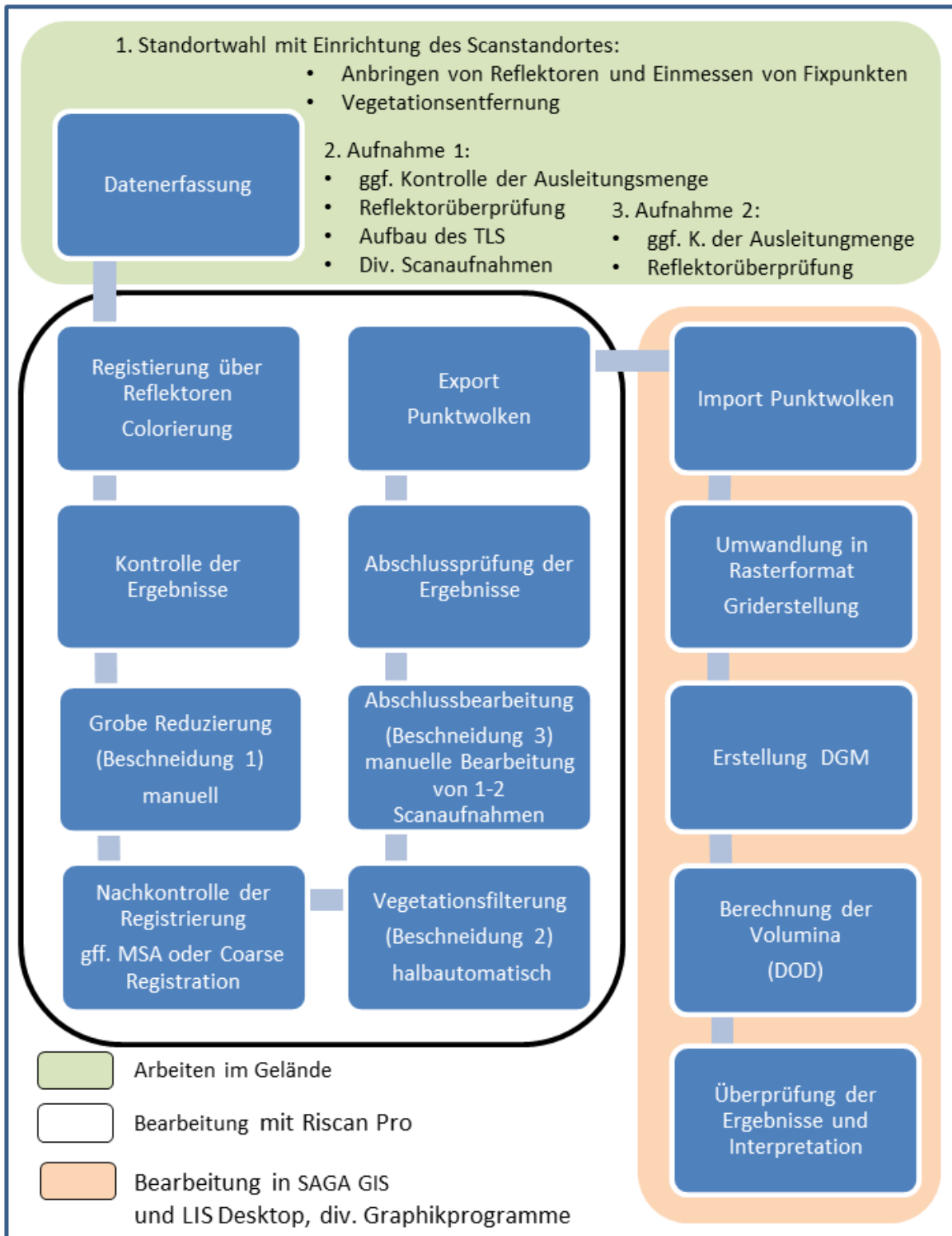


Abb. 5-16: Arbeitsablauf zur Aufnahme und Weiterverarbeitung von TLS-Daten.

Damit erfolgt nach der Colorierung ein erstes Beschneiden der einzelnen Scans, die als Polydata in der jeweiligen Scanposition erzeugt wurden, um überhaupt mit der anfangs (2010) zur Verfügung stehenden Rechnerleistung bearbeitbare Punktwolken zu erzeugen (über 8,5 Mio. Punkte pro Einzelscan). Für die Registrierung wurden jeweils die Folgeaufnahmen auf die Aufnahme davor registriert. Bei Scans, bei denen keine Registrierung über Reflektoren möglich war (aufgrund einer zu geringen Anzahl an Reflektoren, einer schlechten Positionierung oder anderer Mess- und Aufnahmefehler), wurde eine sog. *Coarse Registration* durchgeführt. Über manuelle Selektion von mindestens vier Punktepaaren in beiden Scanaufnahmen werden die Punktwolken der zwei Aufnahmen übereinander gelegt. Die Schwierigkeit hierbei besteht in der Auswahl von zwei gleichen Punkten in einer durch den Zoomfaktor meist abstrakten Punktwolke ohne markante Formen und Kanten.

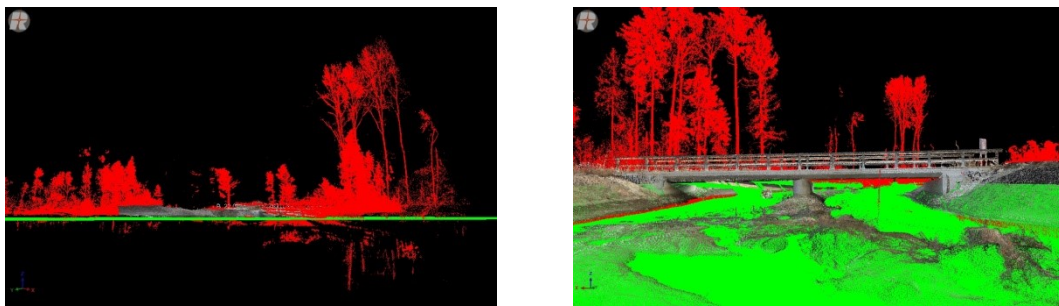


Abb. 5-17: Grobe manuelle Beschneidung (rot eingefärbte Punkte werden entfernt) von Punktwolken über Ebenen (grün).

Die zweite oft im Anschluss verwendete Registrierung, sog. Multi Station Adjustment (MSA), bei welcher jede einzelne Scanposition und damit auch die Punktwolke in einigen Iterationen (ICP – *iterative closest point*-Algorithmus) verändert wird, bis eine noch bessere Übereinstimmung der Punktwolken erreicht ist (BESL & MC KAY 1992, CHEN & MEDIONI 1992, JABOYEDOFF et al. 2012), konnte nicht immer oder nur mit Einschränkungen angewendet werden. Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz dieses Verfahrens sind Flächen bzw. Bereiche, die keine Veränderung erfahren haben. In dem hochdynamischen System des neuen Aubaches kommen solche Bereiche jedoch nicht in ausreichender Größe vor. Zur Optimierung innerhalb einer Aufnahmesequenz war die MSA dennoch hilfreich oder sogar nötig und es konnten so bessere Ergebnisse erzielt werden.

Bei einer zufriedenstellenden Registrierung wurden so viele Aufnahmen wie möglich (abhängig vom Rechner und Scanausschnitt, max. 3 bis 8) geladen, um bei der weiteren manuellen Beschneidung (Beschneidung 2) möglichst viele Scans (auch aus verschiedenen Zeiträumen) gleichzeitig zu beschneiden und so den Bearbeitungsprozess zu verkürzen. Bei schlechten Registrierungsergebnissen (je nach Standort war der Fehler unterschiedlich groß, zwischen 3 mm und 10 mm) wurden die einzelnen Registrierungen wiederholt, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden konnte.

Am Ende der Bearbeitung sollte die Punktwolke keine sog. Flying Points (z.B. Fluginsekten, Blätter, Vögel etc.), möglichst wenig Vegetation und auch keine Spiegelungen des aufgenommenen Objektes mehr beinhalten.

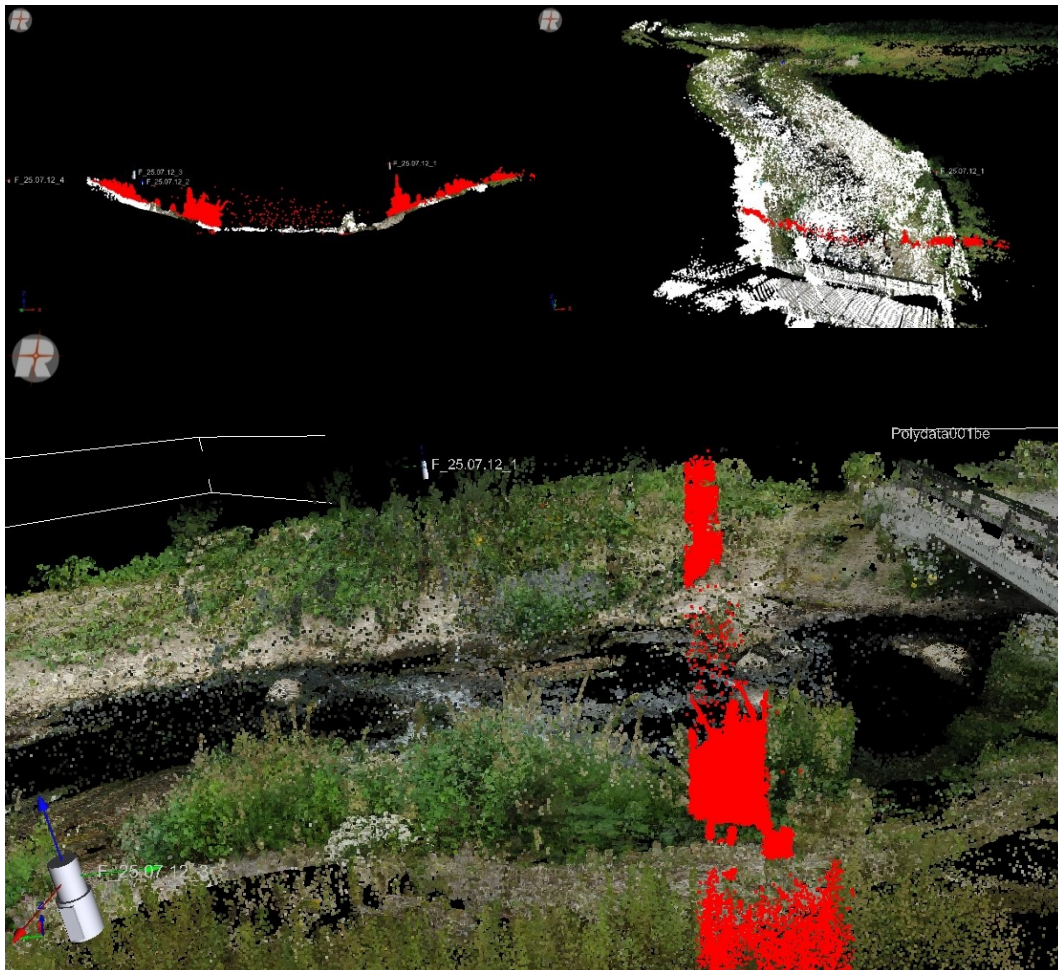


Abb. 5-18: Manuelle Beschneidung von Punktwolken zur Eliminierung von Vegetation und Wasserspiegelungen über 1 Meter-Bänder (rot eingefärbt).

Neben der manuellen und halbautomatischen Beschneidung (Abb. 5-17) der Punktwolken (beispielsweise über die Betrachtung und Beschneidung von 0,5 m breiten Profilansichten der Scanwolken) (Abb. 5-18) wurden auch verschiedene Filter-Optionen (Plane Surface Filter, Vegetation Filter etc.) getestet, allerdings führten diese aufgrund von inhomogenen Flächen oder wegen gleicher Farbwerte, wenn überhaupt, nur zu „Löchern“ in der Punktwolke bzw. „No Data“-Bereichen im Grid. Theoretisch können Farbinformationen dazu benutzt werden, Vegetation automatisch zu filtern (vgl. BERARDIN et al. 2010, RIEGL 2010, HAAS et al. 2012). Dieses Verfahren funktioniert allerdings nur, wenn sich die Farbwerte von der Geländeoberfläche und der Vegetation deutlich unterscheiden, was besonders in den Herbst- und Frühlingsaufnahmen, die einen Großteil der Aufnahmen ausmachen, nicht gegeben ist. Zudem konnte auch bei dieser automatischen Bearbeitung keine wirkliche Reproduzierbarkeit erzeugt werden, da nach einer Überprüfung immer eine manuelle Nachbearbeitung erforderlich war. Eine komplette Entfernung von Vegetationspunkten war

nicht möglich, je nach Fragestellung auch nicht immer gewünscht (siehe Kapitel 5.2.4.3).

Die Polydata wurden dann als ASCII-Daten exportiert, um sie als x-y-z Punktwolken in SAGA GIS/LIS über das Modul *Shape to Grid/Point Cloud to Grid* in ein Grid (rasterzellenbasiert) umzuwandeln. Dabei wurde jeder Rasterzelle der Höhenwert des tiefsten Punktes innerhalb dieser Zellen zugewiesen, um auch in diesem Schritt den Einfluss von restlichen Vegetationspunkten zu minimieren.

Damit werden zwar nicht ausschließlich Bodenpunkte herangezogen, aber wenn in einer Zelle Bodenpunkte und Vegetationspunkte liegen, dann wird der tiefste Punkt und damit wahrscheinlich ein Bodenpunkt zur Griderstellung verwendet. Je nach Steilheit des Geländes und der Höhe von „non-ground“-Punkten (Vegetation und andere Objekte, die nicht die Geländeoberfläche darstellen) können sich die generierten DGM stark voneinander unterscheiden (Abb. 4-19).

Mit diesem Verfahren werden automatisch viele der noch verbleibenden Vegetationspunkte herausgefiltert. Dennoch verbleiben, je nach Standort, auch Bereiche, in denen der Vegetationspunkt fälschlicherweise zur Geländeoberfläche wird, da nur Vegetation gescannt werden konnte (besonders während der Sommer-Aufnahmen). Insbesondere bei steilen Flächen wird der Höhenwert so systematisch überschätzt, was jedoch bei der Betrachtung von Veränderungen eine eher untergeordnete Rolle spielt (vgl. UMSTÄDTER 2015).

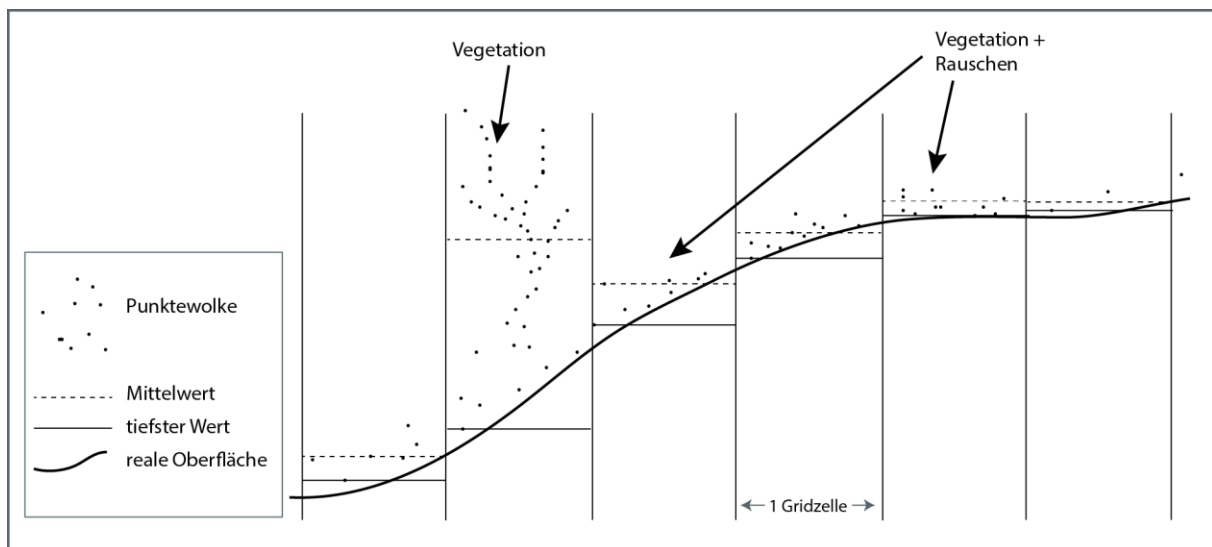


Abb. 5-19: Schematische Zeichnung zu den Höhenunterschieden bei DGM infolge der Umwandlung einer Punktwolke in ein Grid mithilfe des tiefsten Punktes einer Punktwolke oder des Mittelwerts innerhalb der einzelnen Gridzellen (UMSTÄDTER 2015, S. 67).

Als Gridgröße (Rasterzellengröße) wurde für alle Standorte eine einheitliche Gridgröße von 5 cm gewählt, was einer Gridzellengröße von 25 cm² entspricht. Während bei größeren Gridzellen eine starke Generalisierung erfolgt, treten ab einem 4 cm-Raster aufgrund fehlender Werte bereits gehäuft Lücken im DGM auf (Abb. 5-20).

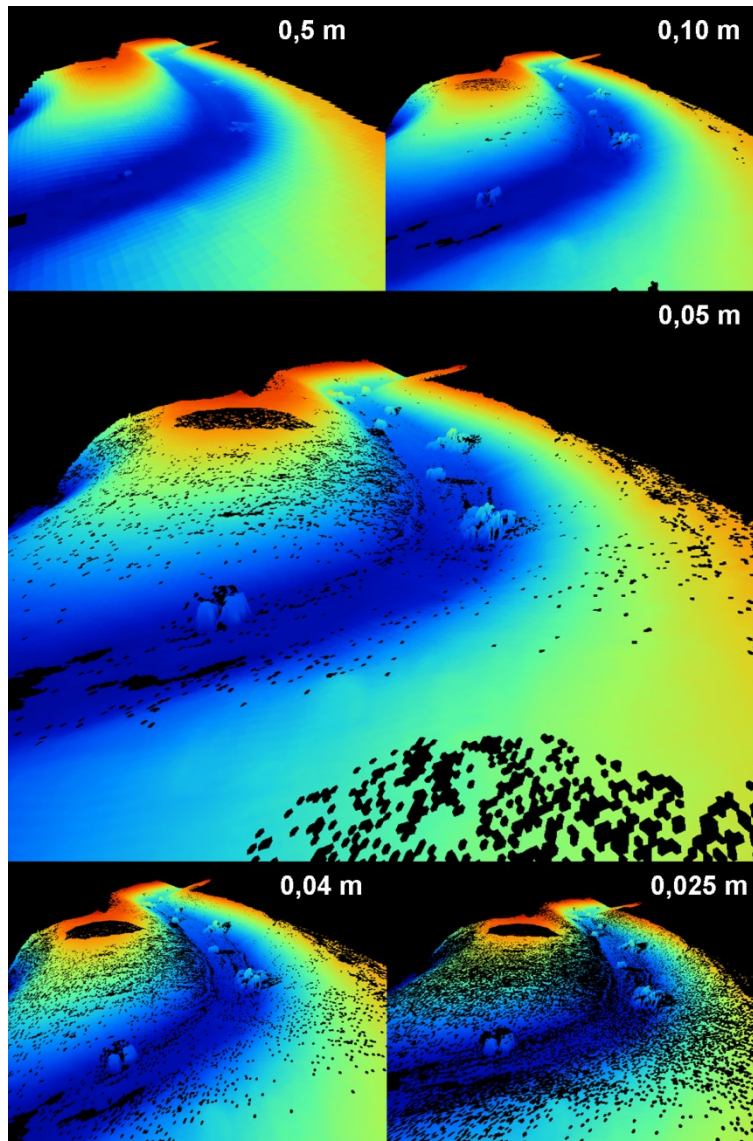


Abb. 5-20: Höhenmodell (Teilabschnitt 1.2, Abb. 3-13) mit gleichen Eingangsdaten, aber unterschiedlicher Wahl der Gridzellengröße. Schwarze Zellen entsprechen No Data-Zellen und führen zu Datenlücken im DGM.

Wegen der steilen Uferbereiche an manchen Standorten (insbesondere an den Prallhängen) und dem planaren Zellsystem, in dem die Software arbeitet (2,5D), war es nötig, die Achsen zu tauschen oder richtig auszurichten. Eine Koordinatentransformation um 90° erfolgte mit allen drei Achsen x-y-z, wodurch eine Transformation der gesamten Punktwolke vorgenommen wurde (NASERMOADDELI & PASCHE 2008). Dabei spielt die Ausrichtung des Scanners zum untersuchten Objekt eine entscheidende Rolle.

Um aus der generierten Geländeoberfläche (z. T. noch mit Vegetation) eine Annäherung an ein „richtiges DGM“ (ohne Vegetation) zu schaffen (vgl. PFEIFER 2003), wurde, wenn es standortabhängig zielführend war, das LIS-Modul *Progressive Morphological Filter* verwendet (Abb. 5-21). Dieses Modul nutzt eine Version des von ZHANG et al. (2003) entwickelten Algorithmus, um letztendlich über festgesetzte Grenzwerte den Höhenunterschied zwischen

zwei benachbarten Zellen zu vergleichen. Zellen, die den festgelegten maximalen Höhenunterschied unterschreiten, werden als „ground“ Gridzelle definiert und erhalten entsprechende Höhenwerte. Alle anderen Zellen gehen nicht in die Berechnung des DGM ein und werden zu „non-ground“ Gridzellen.

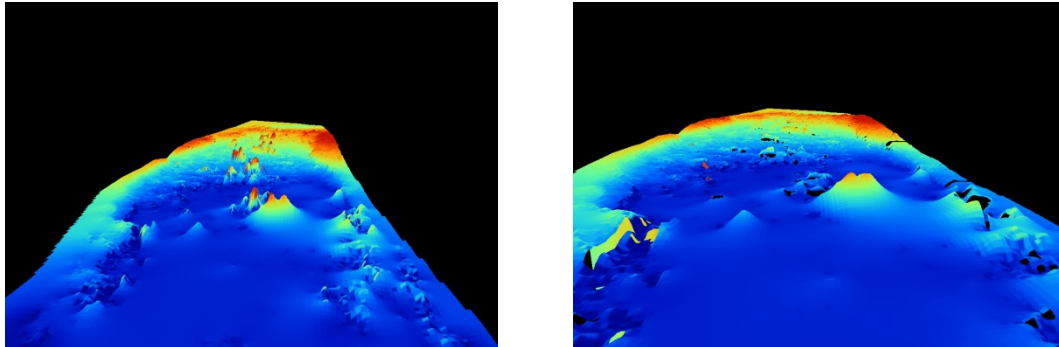


Abb. 5-21: Entfernung der Zellen mit Vegetation durch den *Progressive Morphological Filter*.

Für die Darstellung der Neubaustrecke wurde ein DGM mit 0,05 m Rastergröße nach gleichem Vorgehen erstellt, welches als Grundlagendatensatz für weitere Analysen zur Verfügung steht.

Nach PETER und STAB (2001) und GETIRANA et al. (2009) ist in Auen eine zufriedenstellende flächenhafte Erfassung von Lebensräumen erst durch ein ausreichend genaues Höhenmodell möglich. In der Abbildung 5-20 kann ein Eindruck von unterschiedlichen Gridgrößen und deren Auswirkung für nachfolgende Modellierungen abgeschätzt werden.

5.2.4.3. Datenanalyse und Auswertung (Verarbeitung von Laserpunkten)

Für die eigentliche Analyse wurden die erzeugten DGMs der einzelnen Aufnahmezeitpunkte oder Aufnahmeperioden verglichen bzw. zur Berechnung voneinander abgezogen. Aus dem DEM (engl. digital elevation model) wurden *DEMs of Difference* (DoD) gerechnet.

Zu den oben angesprochenen internen und externen Fehlern, die bei der Datenaufnahme generiert werden, kommen die „Fehler“ der Datenbearbeitung hinzu, wie beispielsweise Registrierungsfehler, Filter- und Bearbeitungsfehler, Verfälschung bei der Umwandlung in ein Grid (u.a. AFANA et al. 2010).

All diese Unsicherheiten sollten bei der Bestimmung von Veränderung mit einfließen (vgl. Abb. 5-14). Nach LANE et al. (2003), WHEATON (2008) und WHEATON et al. (2010A) gilt für die Unsicherheit der Höhe (nicht der Lage) der betrachteten Grids:

$$Z_{\text{actual}} = Z_{\text{DEM}} \pm \delta z$$

mit:

Z_{actual} : realer Höhenwert einer Zelle

Z_{DEM} : gemessener bzw. berechneter Höhenwert der Zelle

δz : Standardabweichung des Fehlers

Durch zwei zeitlich und räumlich direkt aufeinander folgende Scan-Aufnahmen (ohne Umstellen oder Wiederaufbau der Scannereinheit, Veränderung der internen Einstellungen des Geräts oder der Softwareeinstellungen) konnte diese Unsicherheit (Standardabweichung der beiden DEMs) bestimmt werden (HAAS et al. 2012). Bei idealen Bedingungen zweier unmittelbar aufeinander folgender Aufnahmen (Scan 1 und Scan 2) ist theoretisch keine Veränderung der gescannten Oberfläche zu erwarten. Für diese Arbeit wurde ein vereinfachtes Verfahren gewählt, indem pro Scanstandort nur einmal dieser Fehler bestimmt wurde (aufgrund von Erfahrungswerten liegt er auch für unterschiedliche Aufnahmen immer etwa im gleichen Wertebereich). Der ermittelte Wert wurde auf 1 cm gerundet, nachdem bei allen Standorten der Fehler in einem ähnlichen Wertebereich und unter 1 cm lag.

Für die beiden Punktwolken (Scan 1 und Scan 2) wurde die gleiche Vorgehensweise wie bei den eigentlich zu betrachtenden Punktwolken angewendet. Mit dem SAGA-Modul „*Grid Calculator*“ wurde das DEM Scan 1 von dem DEM Scan 2 abgezogen. Bei allen DoDs, also den Höhenmodellen der Veränderung, lag das arithmetische Mittel bei 0. Die Abweichungen sind damit etwa normalverteilt und es ist davon auszugehen, dass keine systematischen Fehler in den Aufnahmen vorliegen.

Nach BRASINGTON et al. (2000) kann mit diesem Vorgehen ein Grenzwert (*level of detection* – LoD) berechnet werden, unter dem eine Veränderung der Höhenwerte der beiden DEMs nicht als statistisch signifikant gewertet wird. Damit gehen Veränderungen, die innerhalb dieses Bereichs liegen, nicht in die Berechnung mit ein.

Bei der Berechnung von Differenz-Höhenmodellen kann der Grenzwert, der sich aus dem Fehler des DEM 1 (Aufnahmezeitpunkt 1) und dem Fehler des DEM 2 (Aufnahmezeitpunkt 2) ergibt, wie folgt angegeben werden (BRASINGTON et al. 2003):

$$\delta u = \sqrt{(\delta z 1)^2 + (\delta z 2)^2}$$

mit:

δu : Fehler innerhalb des DoD

$\delta z 1$ Fehler des DEMs beim Aufnahmezeitpunkt 1

$\delta z 2$ Fehler des DEMs beim Aufnahmezeitpunkt 2

Für das weitere Vorgehen wurde die Abweichung beider Punktwolken als geräteinterner Messfehler unter den jeweiligen externen Einflüssen (interne und externe Einflussfaktoren) festgelegt. Innerhalb dieses Intervalls kann bzw. darf keine Veränderung angenommen werden.

Je nach gefordertem Signifikanzniveau kann die Gleichung angepasst werden. Mit dem Signifikanzniveau der Unsicherheit δu wird der Bereich angegeben, in dem Höhenunterschiede unterhalb des LoD nicht mehr vertrauenswürdig zu detektieren sind (WHEATON et al. 2010A).

Danach ergibt sich bei (BRASINGTON et al. 2003):

$$\delta u = t(\sqrt{\delta z_1^2 + \delta z_2^2})$$

mit:

t: gewähltes Konfidenzintervall

Um den Registrierungsfehler zu berücksichtigen, kann z. B. nach UMSTÄDTER (2015) folgende Gleichung herangezogen werden:

$$\delta u = \sqrt{(\delta z_1)^2 + (\delta \text{Registrierung}_1)^2 + (\delta z_2)^2 + (\delta \text{Registrierung}_2)^2}$$

Weitere Möglichkeiten werden von DOLD et al. (2007) und PROKOP und SINGER (2011) aufgezeigt.

Der Fehler der einzelnen Scanaufnahmen kann nach der Registrierung in der *Tiepointlist* abgelesen werden oder wird bei der *Multi Station Adjustment* mit angegeben. Er lag bei den verschiedenen Standorten bzw. Aufnahmesequenzen zwischen 0,001 m und 0,100 m (bei einem extremen Fall), meist aber im einstelligen Millimeterbereich. Da der Unterschied zwischen dem internen Fehler des Scans und dem kombinierten Fehler (intern und Registrierungsfehler) im mm-Bereich zu vernachlässigen ist (vgl. UMSTÄDTER 2015), wird er in der weiteren Berechnung nicht berücksichtigt. Die Scans der Folgeaufnahme wurden immer auf die Aufnahme davor registriert, da eine Registrierung auf die Erstaufnahme zu schlechteren Ergebnissen bzgl. der Lageübereinstimmung der Punktwolken führte.

Ein weiterer Fehler, der streng genommen schon bei der Datenaufnahme passiert, ergibt sich bei der Aufnahme der *Tiepoints* bzw. der Reflektoren. Für die Fixierung der Reflektoren wurden zwar möglichst alte (je älter der Baum, um so geringer der Zuwachs) Eschen oder Bergahorne verwendet, um damit eine einigermaßen konstante Position der Reflektoren innerhalb des Untersuchungszeitraums zu gewährleisten, dennoch ist eine gewisse Verfälschung der Messung unvermeidlich. Je länger der Zeitraum zwischen den einzelnen Aufnahmen ist, um so größer kann der Unterschied bzw. Fehler sein, der sich aus dem Höhen und Dickenzuwachs ergibt. Das jährliche Stammwachstum von Esche (0,8-6,5 mm) und Bergahorn (1,1-8,5 mm) zeigt eine große Spannweite (HEIN 2003). Auch standortabhängig schwankt das Höhenwachstum erheblich (WEBER-BLASCHKE et al. 2009), ist aber wiederum im Bereich des Brusthöhendurchmessers – entspricht in etwa der Höhe, in der die Reflektoren hängen – zu vernachlässigen. Bei einem Mittelwert von etwa 3 mm (Radialzuwachs) können entsprechende Abweichungen zwischen zwei Scanaufnahmen nicht ausgeschlossen werden. Eine korrekte Berücksichtigung dieser Messunsicherheit aufgrund von veränderlichen *Tiepoints* war nicht möglich. Es konnten nach mehrmaliger Prüfung während verschiedener Registrierungen keine eindeutigen „Verschiebungen“ (in

Höhe oder Lage) festgestellt werden und so wurde der „Baumwachstumseffekt“ rechnerisch nicht weiter berücksichtigt.

Für die Berechnung von Oberflächenveränderungen wurde letztendlich in dieser Arbeit das Saga-Modul „Cut&Fill“ von HECKMANN (2006-2013) nach LANE et al. (2003) verwendet. Hier wird nach Angabe des zuvor ermittelten Fehlers der einzelnen DEM und Auswahl des entsprechenden Signifikanzniveaus (hier 95 %) ein sog. *Significance Difference Grid* berechnet.

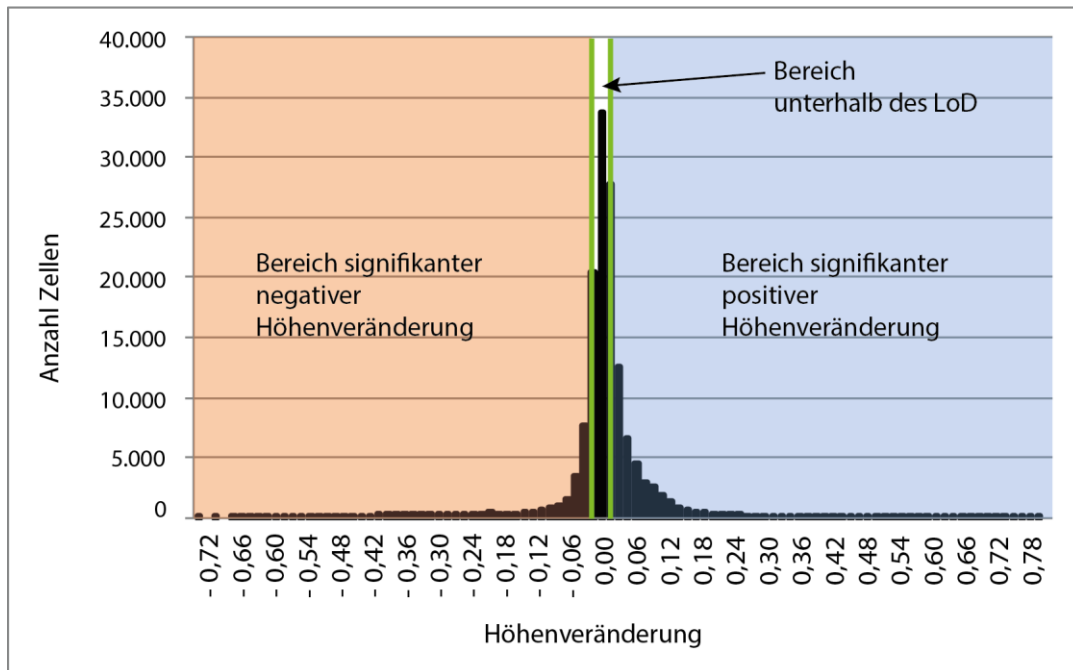


Abb. 5-22: Histogramm (schematisch) eines Difference Grids mit Angabe des LoD und damit den Bereichen signifikanter Veränderung der Oberfläche (UMSTÄDTER 2015, S. 71).

Dieses Modul berechnet die Oberflächenveränderungen zwischen zwei Digitalen Geländemodellen (*Difference Grid*) – und zusätzlich auch die Veränderung dieser unter Berücksichtigung des festgelegten LoDs (*Significance Difference Grid*). Somit können Bereiche (Flächen) signifikanter Veränderung zwischen zwei Höhenmodellen ausgewiesen werden, aber auch Volumenabschätzungen getroffen werden (Abb. 5-22).

Die so ermittelten Veränderungen *Cut* (Erosion) und *Fill* (Akkumulation) beziehen sich aber immer auf eine übereinstimmende Oberfläche von zwei Grids bzw. auf Gridzellen gleicher Größe, die jeweils in beiden Aufnahmen vorkommen. Bereiche, in denen nur in einer Aufnahme Daten vorlagen, konnten nicht in die Berechnung der Volumenveränderung einbezogen werden. Da sich aber schon bald auch Bereiche von besonderem Interesse herausstellten, die nur während einer Aufnahme erfasst werden konnten (Zeitfaktor), wurde zur Veranschaulichung dieser dynamischen Strukturen für manche Standorte „Veränderungsgrids“ erstellt. Hierzu wurden mit dem SAGA-Modul *Reclassify Tool* die Werte entsprechend verändert, so dass jeweils alle Gridzellen der Aufnahme A (Erstaufnahme, (=Klasse 1)) und der Aufnahme B (Folgaufnahme, (=Klasse 2)) sowie alle gemeinsamen

Gridzellen von A+B (=Klasse 3) entsprechend eingefärbt werden konnten (Abb. 5-23).

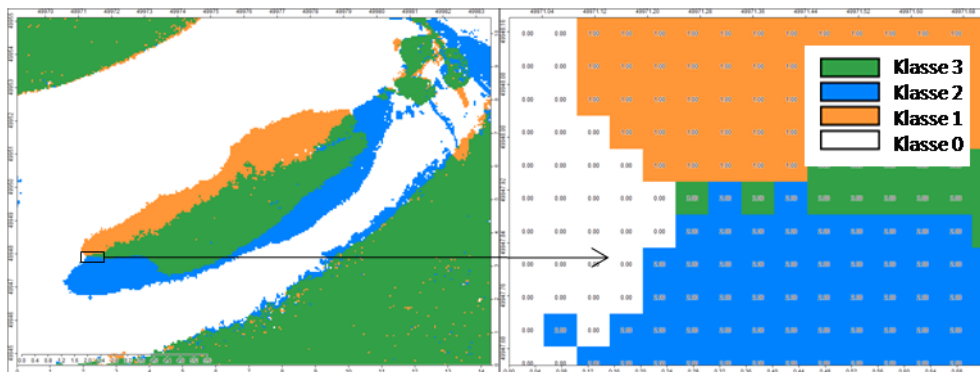


Abb. 5-23: Veränderungsgrid von der Kiesbank an der „Trogrücke“.

Die Oberflächenveränderungen, insbesondere die Prallhangerosion, wurden zur besseren Vergleichbarkeit der Standorte jeweils in m^3 pro m^2 umgerechnet. Zusätzlich wurden die Angaben aus den *Cut and Fill*-Tabellen übernommen und umgerechnet, um auch Angaben zu den jeweiligen Erosions- oder Akkumulationszellen bzw. deren Flächenausdehnung treffen zu können, da bei der Betrachtung von Prallhangveränderungen neben der Gesamtfläche auch die „tatsächlich von Veränderung betroffene Fläche“ eine Rolle spielt (Tab. 5-10). Auch unterhalb des LoD liegende Zellen werden in der Tabelle berücksichtigt. Die Gesamtfläche ergibt sich aus den Rasterzellen (No Change (cut below LoD)) + (No Change (fill below LoD)) + (Overall Balance (without No Change)). Eine Umrechnung in Tonnen (in der letzten Spalte, in Tab. 5-10) soll als Zusatz den Vergleich mit anderen Arbeiten erleichtern, da viele Arbeiten sich auf die Gewichtseinheit beziehen.

Tab. 5-10: *Cut and Fill*-Tabelle mit Erweiterung am Beispiel des Scanstandortes „Trogrücke“ Aufnahme A→B.

Typen	Fläche in m^2	Volumen in m^3	Volumen bezogen auf 1m^2 - der „ <i>Cut and Fill</i> -Fläche“ in m^3	Volumen bezogen auf 1m^2 - der Gesamtfläche in m^3	Volumen der Gesamtfläche in t^*
Erosion unterhalb des LoD (No Change cut)	506,83	5,77	0,011	0,0034	8,9
Akkumulation unterhalb des LoD (No Change fill)	223,92	1,75	0,007	0,0010	2,7
Erosion (Cut)	152,39	13,88	0,091	0,0083	21,4
Akkumulation (Fill)	17,62	2,71	0,153	0,0016	4,2
Oberflächenveränderung (Overall Balance)	170,01	-11,17	-0,065	-0,0067	17,2
Gesamtfläche	1679,66				

* Umrechnung in Tonnen nach 1540 kg/m^3 (Baustoffrechner 2016) Dichte eines Korngemisches aus Sand und Kies (80/20) mit Korngrößen (0-8mm).

Während der Datenaufnahmen und der darauf folgenden Bearbeitung zeigte sich besonders an Prallhängen eine Überdeckung der Uferkante oder ganzer Prallhangbereiche durch Vegetation oder Wurzelteile als größter Störfaktor und einer damit einhergehenden Messunsicherheit bzw. eines Messfehlers. Da unweigerlich das „falsche“ Objekt für die Fragestellung „Prallhangverlagerung“ gescannt wird – zumindest wenn es nur um den Hang als solchen geht (hier dann als vegetationsloses Untersuchungsobjekt definiert). Ein weiterer limitierender Faktor war bei einigen Messungen der Wasserstand, insbesondere bei Hochwasser oder einer ÖF. Wie bereits erwähnt werden die Wellenlängen des LMS Z 420i von Wassermolekülen absorbiert.

Aus dieser speziellen Situation heraus ergab sich die Notwendigkeit einer Aufteilung in vier unterschiedliche Betrachtungsweisen, die zum Teil eine eigenständige Bearbeitung bereits in den Punktwolken erforderte, sie soll hier nun nachfolgend stichpunktartig skizziert werden (Abb. 5-24).

1. **Uferrückverlagerung/laterale Erosion an Prallhängen (Uferkante):** leicht wasserstandlimitiert; die Ausdehnung der untersuchten Fläche, bzw. des Grids spielt eine untergeordnete Rolle (insbesondere wenn es um die Uferkante geht); Achsentransformation: $X \rightarrow Z$ oder $Z \rightarrow Z$; nach Möglichkeit (manuelle Beschneidung der Punktwolke) sollte nur die Geländeoberfläche (Bodenpunkte) ohne Vegetation/Wurzel und Totholz etc. abgebildet werden. Als Resultat ergibt sich ein schmaler Streifen mit wenigen Dezimeter, Höhenausdehnung oder eine Linie mit wenigen Zentimetern. Diese bildet die Uferkante ab. Wahlweise ist auch eine Selektion eines tiefer liegenden Beobachtungsausschnittes möglich, welcher allerdings zunehmend vom Wasserstand beeinflusst wird.
2. **Uferrückverlagerung/laterale Erosion an Prallhängen (Uferausschnitt):** mäßig stark bis stark wasserstandlimitiert; die Ausdehnung des Grids spielt je nach Auswahl der untersuchten Fläche eine untergeordnete bis große Rolle; die betrachtete Fläche kann nur ein schmaler Streifen mit wenigen Dezimetern Ausdehnung innerhalb der Prallhangfläche sein oder die größtmögliche Ausdehnung ohne weitere Strukturen umfassen. Dabei steigt mit wachsender Ausdehnung die Bearbeitungszeit, weil die Beschneidung entsprechend aufwändiger wird. Achsentransformation: $X \rightarrow Z$ oder $Z \rightarrow Z$; nach Filterung wird nur die (reale) Geländeoberfläche ohne Vegetation/Wurzel und Totholz betrachtet. Als Ergebnis (an den in dieser Arbeit untersuchten Prallhängen) entsteht ein mäßig breiter Streifen oder ein über ein bis zwei Meter breites Band, je nach sichtbarem, wasserfreien Bereich.
3. **Prallhangentwicklung und Gleithangablagerung:** stark wasserstandlimitiert; Ziel bei dieser Auswertung ist, eine größtmögliche Ausdehnung des gesamten aufgenommenen Uferbereichs zu erfassen. Achsentransformation: $X \rightarrow Z$ oder $Z \rightarrow Z$; bei dieser Auswertung spielen auch Totholz, Hangabbruchmaterial, Wurzeln etc. als Teil des betrachteten Ufers oder auch Prallhangs eine Rolle. Schwierigkeiten entstehen bei der Abgrenzung, was zum Prallufer gehört und was schon zu den Strukturen der Gewässersohle zu rechnen ist. Hier muss je nach Zielstellung eine klare Trennung erfolgen.
4. **Fließgewässerabschnitt:** mäßig stark wasserstandlimitiert; in der Ausdehnung der betrachteten Strukturelemente wie Kiesbänke kann der Wasserstand eine deutlich beschränkende Wirkung haben, für die Betrachtung des Gewässergrundrisses hat er

eher eine untergeordnete Rolle; Achsentransformation: $Z \rightarrow Z$; Alles bis zum Gewässernahbereich gehört zur AOI; Wasserflächen und darunter liegende Datenpunkte können bei geringem Gefälle über Ebenen (automatisch) gefiltert werden.

Für den Standort an der „1. Rückleitung-Prallhang“ wurde die Uferrückverlagerung über das Zurückweichen der oberen Uferkante bestimmt (Punkt 1). Hierzu wurde nach dem Export der Punktwolken und der Umwandlung in ein Grid mit dem z-Wert in SAGA GIS über das Modul *Contour Lines from Grid* der Umfang ermittelt. Nach der Umwandlung in Shape-Dateien und der Weiterbearbeitung in ArcGIS (Selektion, Beschneidung, Ergänzung der entsprechenden Polylinien) konnte so die Uferlinie zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt ermittelt werden. Vom Scanstandort (Scanposition 1) wurden drei Transekte in 165° , 180° und 210° (vom Scan-Nullpunkt) gelegt (Kapitel 6.2.4.2, Abb. 6.2-43). Wobei das 180° -Transekt im scannereigenen Koordinatensystem die X-Achse und damit die Frontalansicht auf das Untersuchungsobjekt darstellt. Die 165° - und 210° -Transekte erfassen den Anfang (in Fließrichtung) und den hinteren Bereich des Prallhanges. Über Abstandsmessung zwischen den einzelnen Aufnahmen konnte so jeweils die Rückverlagerung bestimmt werden.

Für die anderen Prallhänge wurde die 2. Methode mit einer größtmöglichen Flächenausdehnung (Beschneidung auf den Uferausschnitt), bei der Akkumulationsform „Wegekreuzung“ Methode 3 angewandt. Der Fließgewässerabschnitt an der „Trogbrücke“ und der „1. Rückleitung-Fließgewässerstrecke“ wurde nach Methode 4 bearbeitet.

Für die Ergebnisdarstellung und Interpretation wurden zudem weitere wesentliche Einflussfaktoren mit aufgeführt. Für den Standort an der „1. Rückleitung“ wurden neben den hydrologischen Bedingungen, die sich aus den Dynamisierungsmaßnahmen (ÖF und GWA) ergeben, auch Starkniederschläge, besondere Abflussverhältnisse im OHB sowie anthropogene Umbaumaßnahmen berücksichtigt und zusammen in einer Tabelle mit den jeweiligen Uferrückverlagerungsraten dargestellt (Kapitel 6.2.4.2, Abb. 6.2-44). Je nach Standort ist die Beeinflussung durch diese Faktoren mäßig bis sehr stark.

Für die Starkniederschläge sind die Niederschlagsmengen, die in kurzer Zeit fallen, von besonderem Interesse. An einer professionell betriebenen privaten Wetterstation in Grillheim/Karlskron (www.grillheim-wetter.de) wurden mit $61,6 \text{ l/m}^2$ am 26.05.2010 und $36,5 \text{ l/m}^2$ am 01.02.2013 in der Stunde zwei Extremwerte gemessen. Daten in höherer Auflösung (< 1 Stunde) liegen sonst nur für die Station in Nassenfels vor. In Nassenfels (DWD) konnten im Untersuchungszeitraum sowohl öfter Niederschläge von kurzer Dauer und hoher Intensität als auch lang anhaltende Niederschläge mit großen Niederschlagshöhen gemessen werden (siehe Kapitel 6.2.4).

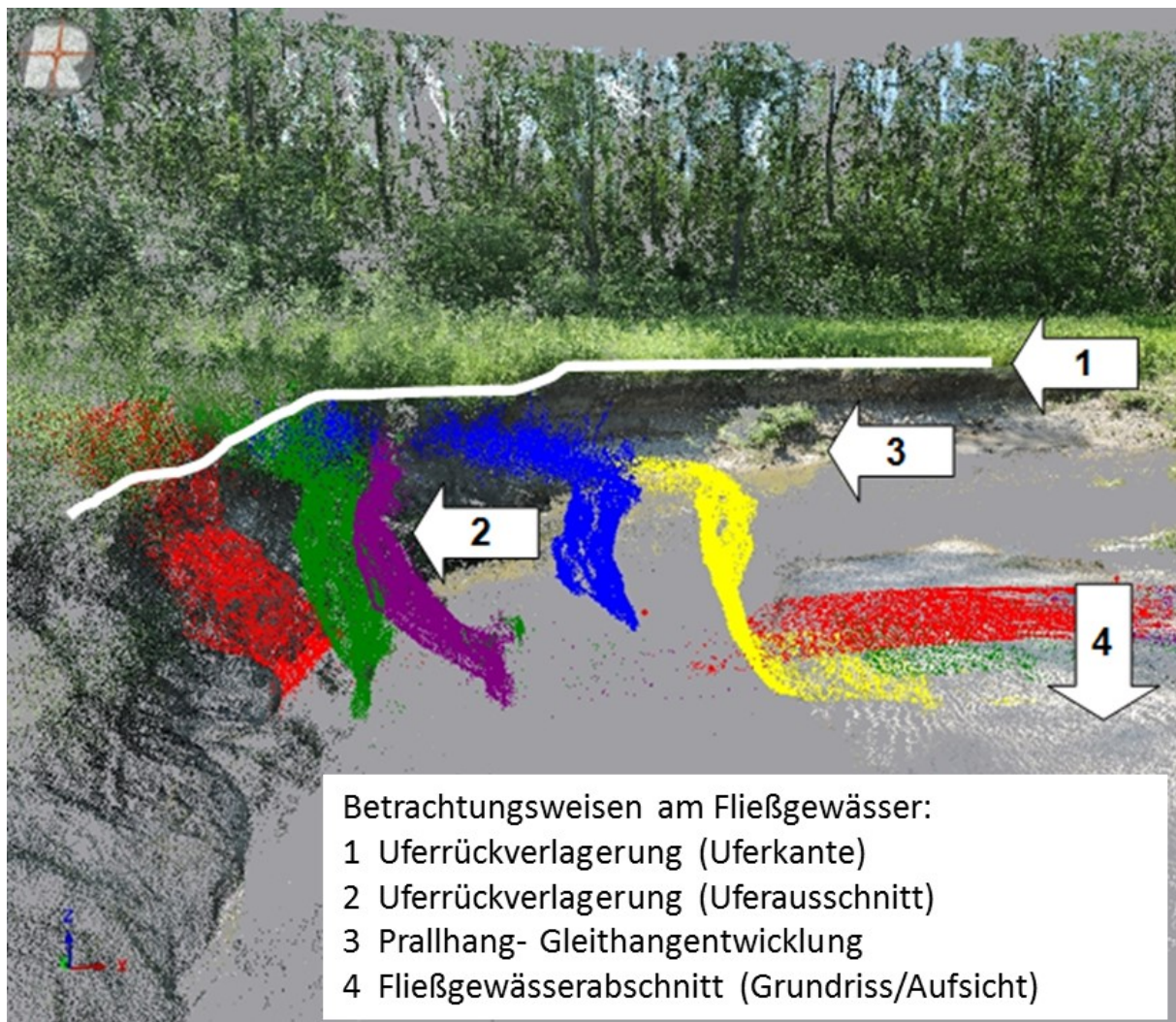


Abb. 5-24: Schema zu den vier unterschiedlichen Betrachtungsweisen bei TLS-Aufnahmen am Fließgewässer. Die Farben repräsentieren einen Ausschnitt einer Punktwolke von aufeinanderfolgenden Aufnahmen (gelb = Aufnahme 1, rot = Aufnahme 5).

5.2.4.4. Alternative Methode: DGM Erstellung durch UAV-Befliegung

UAV und TLS als moderne Methoden zur Erstellung von Höhenmodellen ergänzen sich. Einerseits können mittels TLS Bereiche erfasst werden, die aus der Luft nicht sichtbar oder teilweise nur verdeckt und damit unvollständig in den Luftaufnahmen zu erkennen sind. Andererseits können Abschattungseffekte, die durch ungünstigen Einfallswinkel vom Boden aus entstehen, vermieden werden. Die Vorteile beider Methoden zu verknüpfen und damit den hohen Automatisierungsgrad und die hochgenaue Datenerfassung noch weiter zu optimieren, ist Gegenstand neuer Arbeiten (EISENBEISS & ZHANG 2006, ELTNER 2013, WEGNER 2014) und wurde auch in den Donauauen eingesetzt. Ausführungen zur Methodik, zu dem eingesetzten Flugobjekt und den Feldarbeiten erfolgten bereits im Kapitel 5.2.2.2. Zur Auswertung der gesammelten Daten wurde ebenfalls mit der Abbildung 5.8 der Ablauf vorgestellt. Nach dem Export der Punktwolke schließt sich dann die Weiterbearbeitung zur DGM-Erstellung an (apricot unterlegte Arbeitsschritte in Abb. 5-8 bzw. 5-16). Weitere Ausführungen erfolgen im Ergebnisteil.

5.3 Zusammenfassung – der „dynamische Methodenmix“

Um die abiotischen Parameter, Prozesse und Strukturen zu erfassen, wurde eine Kombination aus unterschiedlichen Methoden und Wissenschaftsdisziplinen gewählt (Tab. 5-11). Was im Kapitel 3.3 als „dynamischer Methodenmix“ erklärt wurde, soll an dieser Stelle konkret mit den Methoden in Verbindung gebracht werden. Dabei kann eine Unterscheidung zwischen den beiden Disziplinen der Hydrologie und Geomorphologie gemacht werden.

Um die hydrologischen und hydraulischen Parameter zu erfassen, wurden in erster Linie mit den permanenten, automatisch aufzeichnenden Pegeln und zusätzlich mit mobilen, nur temporär im Einsatz verwendeten Pegeln die Wasserstände im Umgebungsgewässer, aber auch in anderen Auengewässern erfasst. Fließgeschwindigkeits- und Abflussmessungen sowie die Kartierung der Überflutungsflächen vervollständigen das hydrologische Messprogramm. Eine Auswertung erfolgte meist ereignisabhängig mit üblichen statistischen Verfahren.

Die fluvial-morphologischen Arbeiten konzentrieren sich direkt um das UG_{Gew} und den Gewässernahbereich. Hauptwerkzeug ist dabei der terrestrische Laserscanner, mit dem Oberflächenhöhenmodelle unterschiedlicher Fließgewässerabschnitte erstellt und so Veränderungen detektiert wurden. Ergänzend erfolgte im Überwasserbereich eine Aufnahme über UAV-Befliegung von Teilbereichen aus der Luft, und andere Strukturen wurden vom Boden aus mit Satellitennavigationssystemen erfasst. Zusätzlich wurden für den Unterwasserbereich in unregelmäßigen Abständen Querprofile vermessen. Je nach eingesetzter Methode und Zielstellung erfolgte eine Auswertung mit unterschiedlichen Softwareprogrammen.

Tab. 5-11: Methoden zur Erfassung abiotischer Parameter, Prozesse und Strukturen.

Parameter	Methode/Messung/Standort	Anzahl
Hydrologie		
Wasserstand (OHB)	Pegel (stationär), verteilt entlang des OHB meist an Brückenbauwerken. Messintervall: 15 Min.	12
Seespiegel	Pegel (stationär) in Seen. Messintervall: 15 Min.	2
Wasserstand (Aue)	Pegel (stationär), in temporären Auengewässern u. Altarmen installiert. Messintervall: 15 Min.	4
Wasserstand (Aue+OHB)	Pegel (mobil); ereignisabhängig werden an bis zu 30 Messstellen die Wasserstandsveränderungen automatisch per Datenlogger erfasst. Messintervall: 15 Min.	ca. 20-30
Wasserstand (Aue+OHB)	Messlatten mit manueller Ablesung.	8-10
Abfluss- und Fließgeschwindigkeitsmessungen	An entsprechenden Stellen (Pegelstandorte, Flutrinnen) wurden Abflussmessungen durchgeführt.	>120
Wasserstand-/Abfluss-Beziehung	Aus den Wasserstandsdaten wurden über Schlüsselkurven Abflüsse berechnet.	1
Überflutungsflächen und Wechselwasserzonen	Kartierung mit GPS und dGPS im Bereich des neuen OHB (laufend).	-
Abfluss und Wasserstand Donau, LMB,ZK, Drainagegraben und Aich	Für Donau, LMB, ZK, Drainagegraben und Aich wurden Daten von WWA Ingolstadt und E.ON zur Verfügung gestellt. Messintervall: 30 sec. bis 3 Std.	13
Hydraulische Größen	Ableitung aus der QP- Vermessung	-

Geomorphologie		
Oberflächenveränderung	Komplettaufnahme des Gerinnes (Neubaustrecken) mittels TLS und Datenprozessierung > 70 Scanpositionen	1-2
Oberflächenveränderung	Mehrmalige Aufnahme von morphodynamischen Zonen (an 7 Standorten) (Prall- und Gleithänge, Sandbänke, etc.) mit mehreren Scanpositionen (1-7)	62
Oberflächenveränderung	Befliegung ausgewählter Standorte mit UAV	>7
Veränderung im Querprofil	Aufnahmen von 33 QP mit Erstellung einer Datenbank für morphometrische und hydraulische Größen	5-7
Riffle-Pool-Sequenz	Vermessung von Riffles und Pools	3
Gewässerstruktur	Vermessung von verschiedenen Gewässerstrukturelementen mit dGPS und GPS	3
Vermessung	Vermessung von verschiedenen Monitoringstationen etc.	-
Morphometrische Größen	Bestimmung der Sinuosität, Mäandergürtel etc.	-
Veränderung (Dynamik)	Aufnahmen mit Zeitrafferkamera wurden ausgewertet	>12
Veränderung (Dynamik)	Foto-Dokumentation	>8500

Weitere im Rahmen des Monitorings verwendete Methoden sind bei FISCHER ET AL. (2013) und FISCHER und CYFFKA (in press) zu finden. Auch auf Hilfsmethoden soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

Vielperspektivität ist in der physischen Geographie ein eher selten gebrauchter Begriff, der aber gerade in Zusammenhang mit unterschiedlichen Aufnahmegeräten und ihren Möglichkeiten zur Visualisierung nicht unpassend erscheint, gerade wenn die Messung oder Betrachtung des Untersuchungsobjektes aus unterschiedlichen Dimensionen und unter Zuhilfenahme verschiedener Messgeräte erfolgt. Die raum-zeitlichen Veränderungen der hydrologischen Parameter eignen sich besonders, um die Notwendigkeit dynamischer Erfassungsmethoden zu veranschaulichen. Ein geringer Wasserstandsanstieg kann bereits die manuelle Erfassung stark limitieren und damit einen Methodenwechsel erfordern, z. B. wenn Standorte für eine in situ Messung nicht mehr erreicht werden können (Messlattenablesung) oder das Untersuchungsobjekt sich temporär unter Wasser (Uferbereiche) befindet oder gar verdriftet worden ist (Totholz).

Ein Methodenmix, also die ergänzende Verwendung von unterschiedlichen Verfahren, um Fragestellungen zufriedenstellend beantworten zu können, ist nicht immer unproblematisch, da damit oft auch ein Sprung in der Datenqualität verbunden ist.

Für die Betrachtung der verschiedenen Dimensionen des FG-Auen-Systems und die damit einhergehende Vielzahl an benötigten Messparametern ist nach Ansicht des Verfassers ein breitgefächertes Methodenspektrum notwendig, was an die individuellen und situationsbedingten Bedürfnisse der Messkampagne angepasst werden muss.

6. ERGEBNISSE

6.1 Hydrologische Untersuchungen

6.1.1 Wasserstandsmessungen und Ganglinienanalyse

6.1.1.1. Ausgewählte hydrologische Ereignisse

Zur Erfassung der hydrologischen Prozesse (vertikale Wasserstandsschwankungen und horizontale Ausbreitung des Wassers, Kapitel 3.2, Abb. 3-1) wurde neben anderen Arbeiten, ein Pegelnetzwerk aus stationären und mobilen Pegeln angelegt (siehe Kapitel 5.1.1.1). Die Auswertung und Ergebnisdarstellung der Wasserstandsdatenreihen erfolgt getrennt, nach unterschiedlichen Auengewässern (auch Kapitel 5.1.1.1) und ereignisbezogen. Im Folgenden werden einige wichtige hydrologische Ereignisse den Detailbetrachtungen an einzelnen Gewässern vorangestellt.

Seit dem 09.06.2010 wird der OHB permanent mit einer an den Donaudurchfluss angepassten Wassermenge beschickt (Kapitel 4.2.1.1, Tab. 4-5). Es konnten bis zum 30.07.2015 13 Ökologische Flutungen unterschiedlicher Intensität und Dauer durchgeführt werden (Tab. 6.1-1).

Tab. 6.1-1: Übersicht über die bisher erfolgten Ökologischen Flutungen. Die Einteilung der Stufen erfolgt nach Tabelle 6.1-3 (* siehe Erklärung im Text).

Ökologische Flutung	Datum	Q _{MAX} Donau (m ³ /s) Ingolstadt	Dauer der Ausleitung (Tage)	Dauer der Ausleitung (Stunden)	Wassermenge gesamt m ³ /s (BW1+BW4)	Stufe
ÖF 1	20.07.–21.07.2011	750	0,98	23,5	1.269.000	1
ÖF 2	23.01.–25.01.2012	900	2,19	52,5	4.734.000	2
ÖF 3	13.06.–14.06.2012	680	0,82	19,75	1.737.000	1
ÖF 4	10.10.–11.10.2012	800	1,29	31	3.240.000	2
ÖF 5	17.12.2012	600	0,17	4	432.000	1
ÖF 6	18.12.2012	615	0,83	20	2.160.000	1
ÖF 7	23.12.–27.12.2012	840	4,06	97,5	10.530.000	3
ÖF 8	06.01.–08.01.2013	740	0,88	21	2.268.000	1
ÖF 9	04.02.–07.02.2013	925	4,08	98	10.584.000	3
ÖF 10	10.06.–16.06.2013	1.200	3,96	95	8.033.400	3–4*
ÖF 11	04.01.–07.01.2015	900	2,21	53	5.724.000	2
ÖF 12	02.05.–11.05.2015	910	4,96	119	12.852.000	3
ÖF 13	21.05.–22.05.2015	750	1,13	27	2.916.000	1

Zusätzlich zu den ÖF ereigneten sich mehrere kleinere, natürliche Hochwasser (vgl. 4.2.1.2), von denen nur die für die Arbeit besonders relevanten in Tabelle 6.1-2 aufgeführt werden.

Eine Übersicht aller Hochwasserereignisse über 600 m³/s (Grenzwert für ÖF) kann der Tabelle im Anhang 6.1-1 entnommen werden. Im Juni 2013 erreichte die Wasserführung 1.250 m³/s, so dass Wasser ungesteuert über das Streichwehr (Abb. 4-14, links) in den Auwald floss. Erst nachdem der Donauabfluss wieder unter 1000 m³/s sank, konnte nach Planfeststellungs-bescheid am 10. Juni 2013 das Ausleitungswehr für die 10. ÖF geöffnet werden. Innerhalb der fünf Jahre (2010 bis 2015) wurde aufgrund von Niedrigwasserzeiten der Donau die Grundwasserabsenkung dreimal umgesetzt (Tab. 6.1-2).

Tab. 6.1-2: Übersicht über ausgewählte hydrologische Ereignisse (ohne ÖF).

Ereignis	Datum	Bemerkung
Hochwasser	03.06.2010 bis 05.06.2010	Erstes Hochwasser (1200 m ³ /s) nach Bauarbeiten
Testausleitung	09.06.2010	Wasser fließt das erste Mal durch das fertiggestellte Gerinne
Eröffnung	29.06.2010	Inbetriebnahme des OHB mit kurzem Aussetzen der Ausleitungsmenge am 28.06.2010
Hochwasser	06.08.2010 bis 10.08.2010	Erstes Hochwasser (1240 m ³ /s) nach Inbetriebnahme
Hochwasser	09.01.2011 bis 18.01.2011	Hochwasser (1150 m ³ /s), aber zu hohe Grundwasserstände, deshalb ohne ÖF
Mindestwasserabfluss	20.12.2011 (3 Std.)	Mindestwasserabfluss (< 0,5 m ³ /s) (tech. Defekt und Verklausung im Fischpass)
Juni-Hochwasser 2013	31.05.2013 bis 08.06.2013	Erste natürliche Flutung (Flutung über Streichwehr)
1.Grundwasserabsenkung	14.11.2011 bis 13.12.2011	29 Tage (lang)
2.Grundwasserabsenkung	14.08.2012 bis 24.08.2012	10 Tage (kurz)
3.Grundwasserabsenkung	20.06.2014 bis 30.06.2014	10 Tage (kurz)

Die bisherigen ÖF unterscheiden sich in ihrer Dauer, der ausgeleiteten Wassermenge, den hydrologischen Ausgangsbedingungen und den Wasserständen in diversen Auengewässern deutlich und wurden auf Grundlage der Wasserstände und der sich ergebenden Flutungsflächen (Kapitel 6.1.2) in unterschiedliche Stufen eingeteilt (Tab. 6.1-8). Die ÖF erfolgten größtenteils, dem Abflussregime entsprechend, in den Sommer- und Wintermonaten (Kapitel 4.1.3.1). Fünf der bisher erfolgten ÖF waren kürzer als ein Tag und wurden inklusive des letzten Ereignisses der Stufe 1 zugeordnet, jeweils drei ÖF gehören der Stufe 2 und der Stufe 3 an. Bei der 10. ÖF kann eine eindeutige Zuordnung zu einer Stufe nicht erfolgen, da direkt zuvor das natürliche Hochwasserereignis im Juni 2013 stattfand (natürliche Flutung) (Tab. 6.1-1). Eine klare Trennung von natürlichem Hochwasser und ÖF ist in diesem Fall nicht möglich, deshalb kann dieses Ereignis der Stufe 3 oder Stufe 4 zugeordnet werden, wobei die Auswirkungen der Stufe 4 entsprechen. Die Flutung nach dem Bemessungsereignis (Kapitel 5.1.1.4) würde mit 18.144.000 m³ zusätzlicher Wassermenge (durch weitere 49 Stunden-Ausleitung) noch deutlich über der bisher längsten Flutung liegen.

6.1.1.2. Donau

Die Abflussdynamik der Donau ist, wie bereits im Kapitel 4.1.3 beschrieben, deutlich alpin geprägt. Die Analyse der Ganglinie 1924 bis 2014 ergibt die bereits im Kapitel 4.1.3.1

aufgeführten gewässerkundlichen Hauptzahlen. Wie schon erklärt, hängt der Abfluss des OHB von der Wasserführung der Donau ab (Tab. 4-5) und auch einige wichtige Rahmenbedingungen sowie die Steuerung der Maßnahmen (ÖF und GWA) werden maßgeblich durch die Abflussverhältnisse der Donau bestimmt. Deshalb werden an dieser Stelle auch kurz die langjährigen Abfluss- bzw. Durchflusszeitreihen sowie die Abflussverhältnisse im Beobachtungszeitraum (01.01.2010-31.12.2013) näher betrachtet.

Einen ersten Überblick über die täglichen und monatlichen Durchflussverhältnisse der letzten 91 Jahre gibt Abbildung 6.1-1 A.

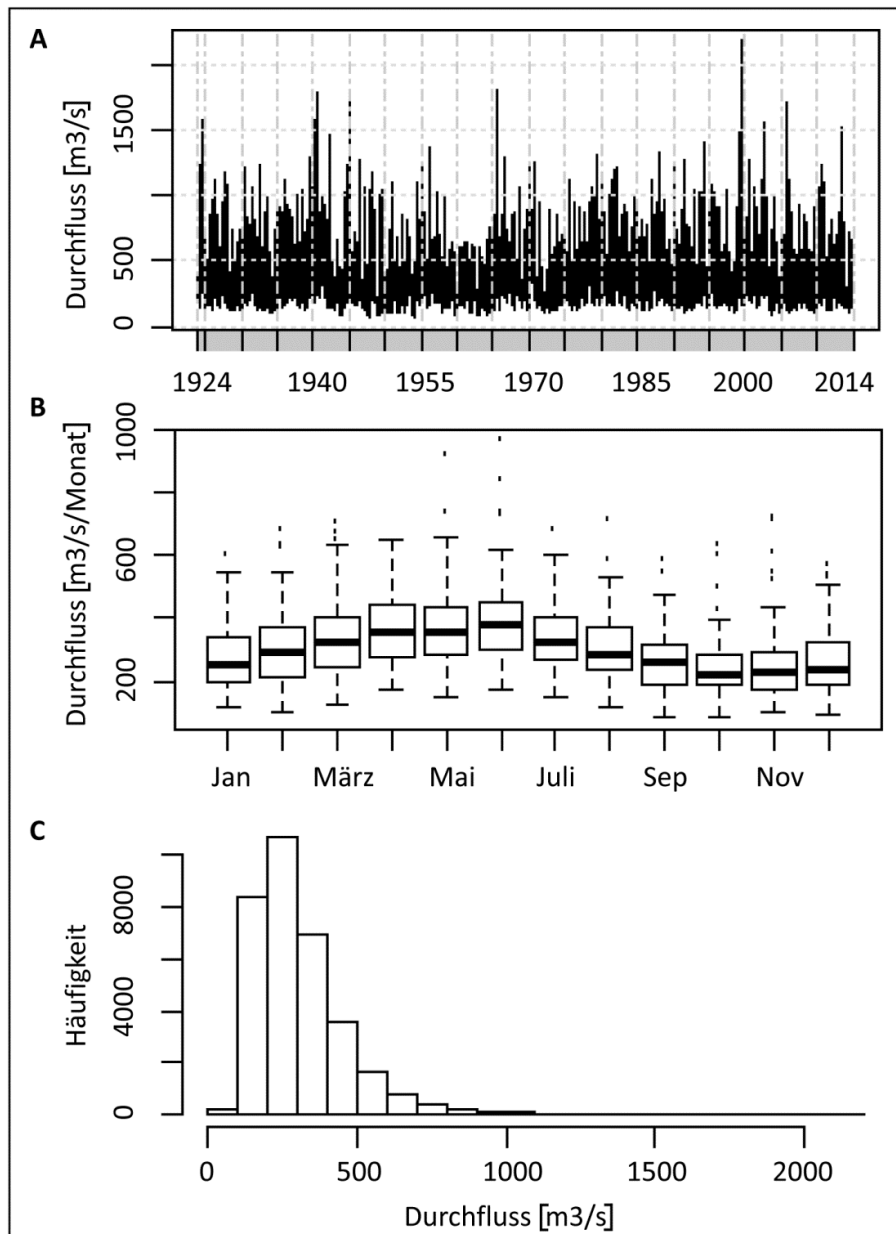


Abb. 6.1-1: Tagesmittelwerte (A), Schwankungen der mittleren monatlichen Durchflüsse (B) und Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse (C) (Daten: Donau, Ingolstadt 1924 bis 2014, Quelle:LFU-GKD (2015)).

Bei der Verteilung der Monatsmittelwerte (Box-Plots, Abb. 6.1-1 B) lässt sich das in Kapitel 4.1.3 erwähnte pluvio-nivale Abflussregime erkennen. Die in Klassen eingeteilten täglichen Durchflüsse streuen um den Mittelwert von $312 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 4-2) und lassen eine Einschätzung der Wasserführung der letzten neun 9 Dekaden zu (Abb. 6.1-1 C). Für die Tagesmittelwerte bildet der Durchflussbereich zwischen $200 \text{ m}^3/\text{s}$ und $300 \text{ m}^3/\text{s}$ die Klasse mit den meisten Werten, danach folgt die Klasse zwischen $100 \text{ m}^3/\text{s}$ und $200 \text{ m}^3/\text{s}$ Durchfluss. Weitere Ausführungen zu den Durchflussverhältnissen der Donau werden im Folgenden auf die letzten vier bis fünf Jahre (2010 bis 2014) beschränkt, da sie für die vorliegende Arbeit eine besondere Relevanz haben.

In Abbildung 6.1-2 A ist der Tagesgang des Durchflusses in der Ganglinie zu erkennen und zeigt, über die Ausschläge, die Hochwasserereignisse der letzten Jahre. Dem Jahr 2011 mit geringeren Durchflüssen stehen die Jahre 2010 und 2013 mit relativ hohen Durchflüssen gegenüber. Das Jahr 2012 liegt mit einem mittleren Durchfluss von $315 \text{ m}^3/\text{s}$ dazwischen und nahe am langjährigen Mittelwert. Das Jahr 2013 zeigt mit einem deutlich höheren Schwankungsbereich im Vergleich zu 2012 den Einfluss des schon erwähnten Juni-Hochwassers (Abb. 6.1-2 A). In der mittleren Abbildung (Abb. 6.1-2 B) zeigen die Monate Januar, Juni und Dezember die höchsten monatlichen Durchflussschwankungen. Hier spiegeln sich wiederum die Sommer- und Winterhochwasser deutlich wider. Bei der Verteilung der jährlichen Häufigkeiten folgt die Klasse zwischen $250 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $375 \text{ m}^3/\text{s}$ der Klasse mit dem Durchflussbereich zwischen $125 \text{ m}^3/\text{s}$ und $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 6.1-2 C).

Aus den Häufigkeitsverteilungen in den Abbildungen 6.1-1 C und 6.1-2 C, die graphisch als Histogramm dargestellt werden, lässt sich ablesen, wie häufig ein bestimmter Durchfluss (hier in Klassen zugeordnet) im untersuchten Zeitraum auftrat.

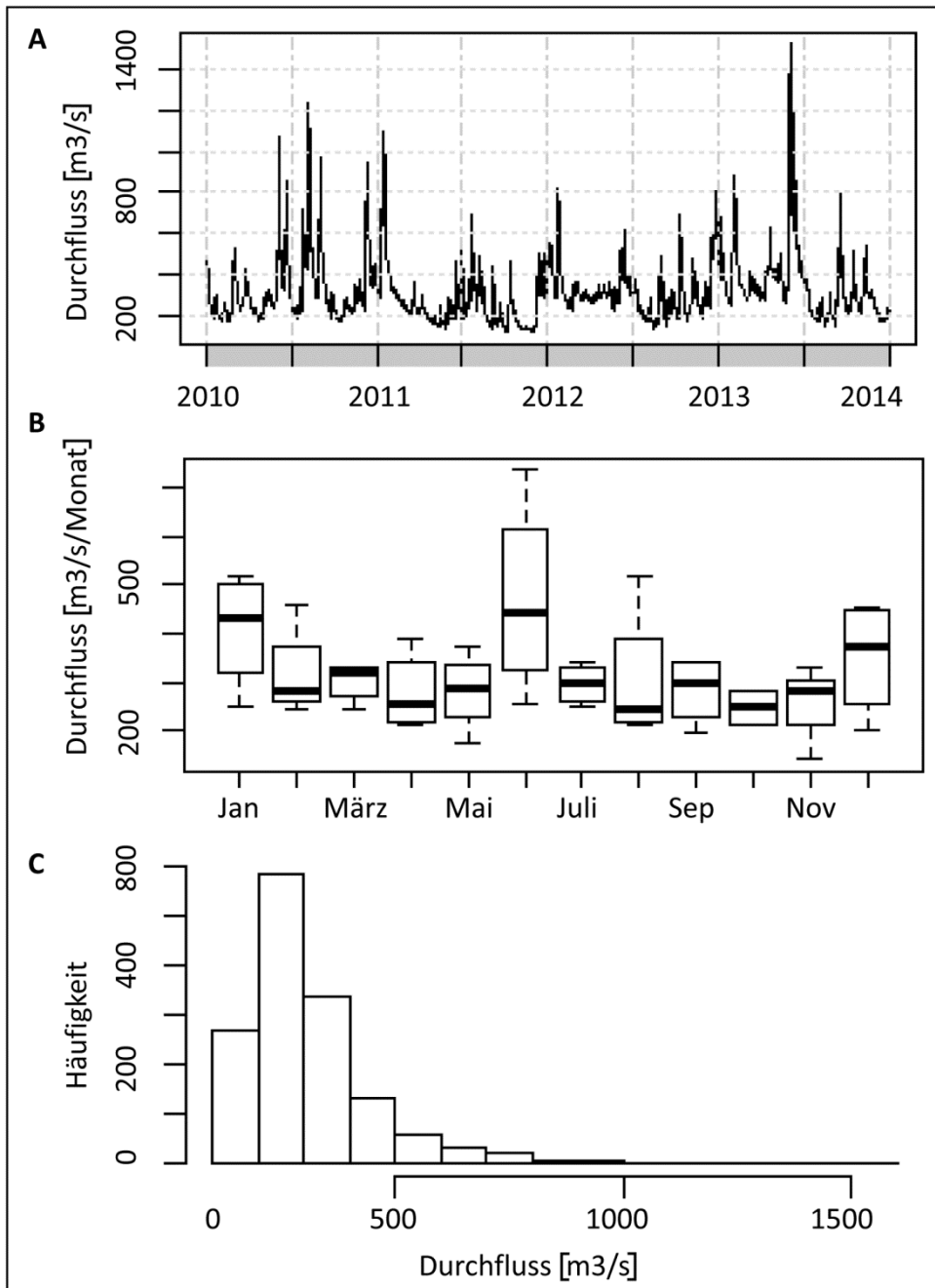


Abb. 6.1-2: Tagesmittelwerte (A), Schwankungen der mittleren monatlichen Durchflüsse (B) und Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse (C) (Daten: Donau, Ingolstadt 2010 bis 2013, Quelle: LFU-GKD (2015)).

Um konkrete Aussagen darüber treffen zu können, wie häufig ein bestimmter Wert über- oder unterschritten wird, wurden Dauerlinien gebildet. Zur Darstellung der Überschreitungs- bzw. Unterschreitungsdauer der einzelnen Durchflusswerte im langjährigen Mittel wurden die Summenhäufigkeiten aller 91 Abflussjahre zusammengefasst. In Abbildung 6.1-3 wird die mittlere Dauerlinie des Gesamtzeitraumes sowie die obere und untere Hüllkurve präsentiert.

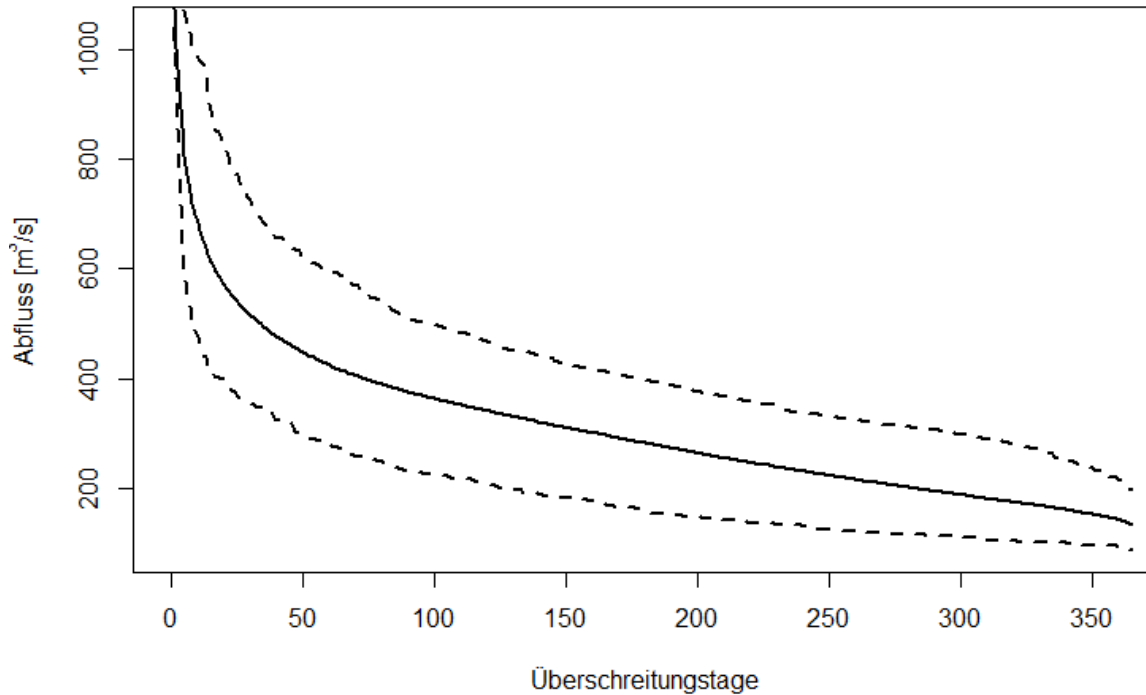


Abb. 6.1-3: Mittlere Dauerlinie des Durchflusses (Überschreitungstage) mit oberer und unterer Hüllkurve (gestrichelt) (Daten: Donau, Ingolstadt 1924-2014, Quelle: LFU-GKD (2015)).

Aus der Abbildung 6.1-3 lassen sich die folgenden Überschreitungstage (bzw. Unterschreitungstage) ablesen:

- 150 m³/s (Start der GWA) werden im Mittel an 352 Tagen überschritten und an 13 Tagen unterschritten. Während es bei der oberen Hüllkurve zu keiner Unterschreitung kommt, zeigt die untere Hüllkurve 194 Tage Überschreitung.
- Der mittlere Abfluss (MQ) mit 312 m³/s wird an 147 Tagen über- bzw. an 218 Tagen unterschritten. Bei der oberen Hüllkurve ergeben sich 278 Tage mit einer Überschreitung, bei der unteren nur noch 46 Tage.
- 600 m³/s (Start der ÖF) werden an 16 Tagen überschritten bzw. an 349 Tagen unterschritten. Die obere Hüllkurve zeigt eine Überschreitung der 600 m³/s-Marke an 60 Tagen und eine Unterschreitung an 305 Tagen, wohingegen die untere Hüllkurve nur an etwa 5 Tagen den oben genannten Abfluss überschreitet.
- Das halbjährliche Hochwasser HQ_{0,5} mit 800 m³/s liegt zwischen den beiden Grenzwerten für eine ÖF. Dieser Wert wird an 5 Tagen überschritten bzw. an 360 Tagen unterschritten (obere Hüllkurve: 22 Tage, untere Hüllkurve 3 Tage Überschreitung).
- Der Abfluss bei einem HQ₁ mit 1000 m³/s wird nur noch an 2 Tagen überschritten (bei der oberen Hüllkurve noch an 8,5 Tagen und bei der unteren an weniger als 2 Tagen).

Für die letzten fünf Jahre wurden die Dauerlinien einzeln gebildet (Abb. 6.1-4). In den letzten fünf Jahren zeigen die Überschreitungsdauerlinien einen sehr unterschiedlichen Verlauf, der im Vergleich der einzelnen Überschreitungstage pro Jahr deutlich wird. Es lässt sich anhand

der Abbildung ablesen, wie oft ein bestimmter Wert im Jahr x über- oder unterschritten wurde. Der Median lässt sich bei einer Dauer von 182,5 Tagen abgreifen.

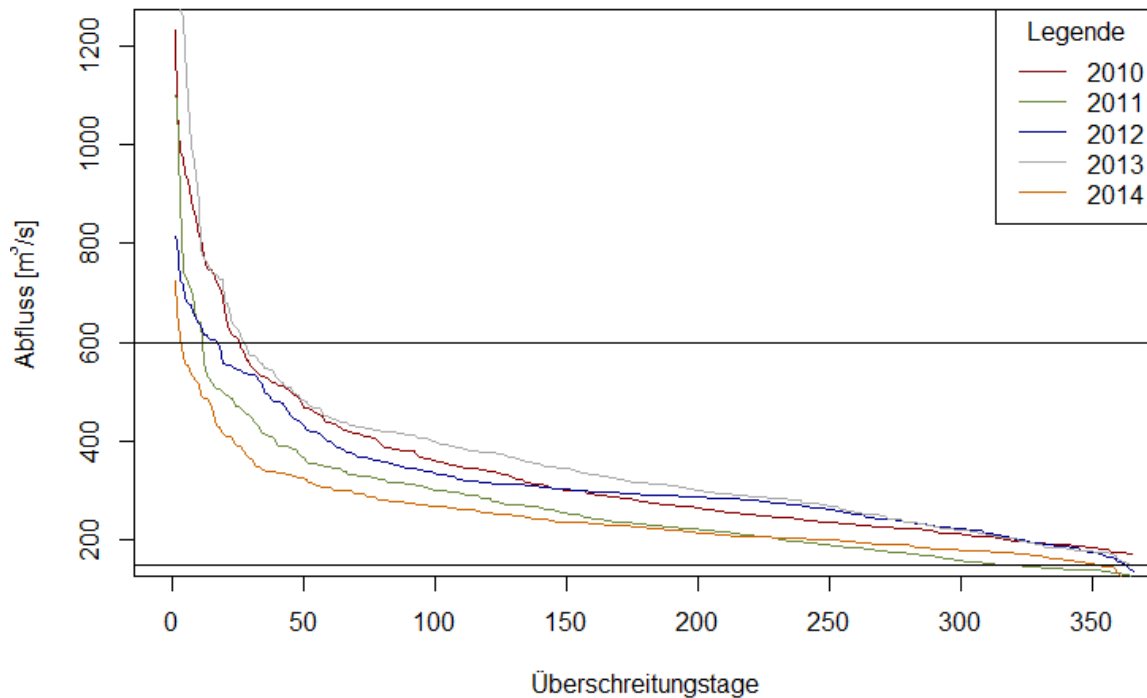


Abb. 6.1-4: Dauerlinien der Überschreitungstage mit eingezeichneten Grenzlinien für 150 m³/s und 600 m³/s Durchfluss (Daten: Donau, Ingolstadt 2010-2014, Quelle: LFU-GKD (2015)).

- Ein Abfluss von 150 m³/s konnte nur an den drei abflussschwächeren Jahren unterschritten werden: an zwei Tagen 2012 (Überschreitung an 364 Tagen (Schaltjahr)) und an 13,5 Tagen 2014. 2011 wurde der Grenzwert sogar an 49 Tagen unterschritten bzw. an 316 Tagen überschritten.
- Der mittlere Abfluss von 312 m³/s wird zwischen 53 Tagen (2014) und 175 Tagen (2013) überschritten (Überschreitungstage 2011 = 82 Tage, 2012 = 120 Tage und 2010 = 135 Tage).
- Die 600 m³/s-Grenze wird zwischen 3,5 und 27 Tagen überschritten bzw. an 361,5 oder 338 Tagen unterschritten (Überschreitungstage 2010 = 25,5 Tage, 2011 = 11,5 Tage, 2012 = 17 Tage, 2013 = 27 Tage und 2014 = 3,5 Tage).
- Das HQ₁ mit 1000 m³/s wird im Beobachtungszeitraum von fünf Jahren nur in drei Jahren überschritten: 2010 an 3 Tagen, 2012 an 2,5 Tagen und 2013 an 7 Tagen.

Mit dieser Auswertung wird bereits ersichtlich, wie unterschiedlich einzelne Jahre sein können und welche Spannbreiten sich aus den variierenden Abflüssen für die Anzahl der Überschreitungstage (bzw. Unterschreitungstage) ergeben. Da nicht jede Überschreitung des maßgeblichen Grenzwertes von 600 m³/s auch eine Ökologische Flutung nach sich zieht und zudem die Dauer eines Ereignisses ebenso von Interesse ist, soll eine weiterführende Betrachtung der Hochwasserereignisse folgen.

Bei der Analyse der Hochwasserereignisse kann aufgrund der projektspezifischen Steuerung zwischen Hochwasserereignissen mit 600 m³/s bis 1000 m³/s und größer 1000 m³/s unterschieden werden. Die Auswertung von 128 Ereignissen in 62 Jahren (1939-2000) zeigt, dass die durchschnittliche Dauer von Hochwasserereignissen zwischen 600 m³/s und 1000 m³/s bei 6,4 Tagen liegt (Tab. 6.1-3). In den letzten fünf Jahren traten insgesamt 20 weitere Hochwasser auf, davon 16 über 600 m³/s bis 1000 m³/s und vier Ereignisse mit Abflüssen über 1000 m³/s auf, wohingegen aufgrund von speziellen hydrologischen Ausgangsbedingungen (hohe Grundwasserstände, kurze Dauer etc.) nur 10 ÖF im Zeitraum durchgeführt wurden (Tab. 6.1-1). Werden die Tagesmaxima berücksichtigt, können nochmal sieben weitere Ereignisse hinzugezählt werden.

Tab. 6.1-3: Anzahl und durchschnittliche Dauer der Hochwasserereignisse in den Jahren (1939-2000) nach WWA Ingolstadt, ergänzt um die Jahre 2010-2014 mit Daten vom Pegel Luitpoldstrasse, Quelle: LFU-GKD (2015).

	Anzahl Hochwasser 600 bis 1000 m³/s	Durchschnittliche Dauer in Tagen	Maximale Dauer in Tagen	Minimale Dauer in Tagen	Anzahl Hochwasser > 1000 m³/s	Durchschnittliche Dauer in Tagen	Maximale Dauer in Tagen	Minimale Dauer in Tagen
(1939-2000)	128	6,4	9,3	4,0	61	9,4	11,2	6,4
2010	5	3,4	7	1	2	4	5	3
2011	1	1	1	1	1	9	9	9
2012	4	4,25	9	1	-	-	-	-
2013	4	2,75	6	1	1	16	16	16
2014	2	1	1	1	-	-	-	-

6.1.1.3. Ottheinrichbach

Mit der Kenntnis der hydrologischen Ausgangsbedingungen soll nun der eigentliche Akteur im UG, der Ottheinrichbach, näher charakterisiert werden. Dabei spielt neben den Abflussverhältnissen für auenökologische Fragestellungen besonders die Dynamik der Wasserstände (Dauer, Amplituden) eine entscheidende Rolle. Die Lage der Pegel, auf die sich die folgenden Auswertungen beziehen, ist dem Kapitel 5, Abbildung 5-2, zu entnehmen. Aus den sieben in der Abbildung 6.1-9 dargestellten Hydrographen lässt sich das Abflussgeschehen im UG_{Gew} ausreichend gut beschreiben (die kompletten Ganglinien der permanenten Pegel sind im Anhang 6.1-2 zu sehen). Die hydrologische Dynamik und die Wasserstandsschwankung im OHB selbst werden über die Strecke von 8,4 km durch diese sieben Pegel sehr gut abgebildet. Für eine weiterführende Auswertung und Berücksichtigung der Zuflüsse sowie der hydrologischen Verhältnisse weiterer Auengewässer (auch

Rückstaubereiche des OHB) werden zusätzliche Wasserstandsreihen benötigt, die mit dem mobilen Pegelsystem aufgezeichnet wurden.

Zur Beschreibung der hydrologischen Verhältnisse und als Eingangsparameter für zahlreiche Anwendungen werden Wasserstands- und Abflusszeitreihen benötigt. Auch bei der „Trogbrücke“, dem weitgehend stabilsten Gerinnequerschnitt (siehe Kapitel 4.2.1.1) konnte aufgrund von Setzungen im Bereich der Gewässersohle nur ein Teil der erhobenen Daten zur Aufstellung der W-Q-Beziehung verwendet werden (Abb. 6.1-5).

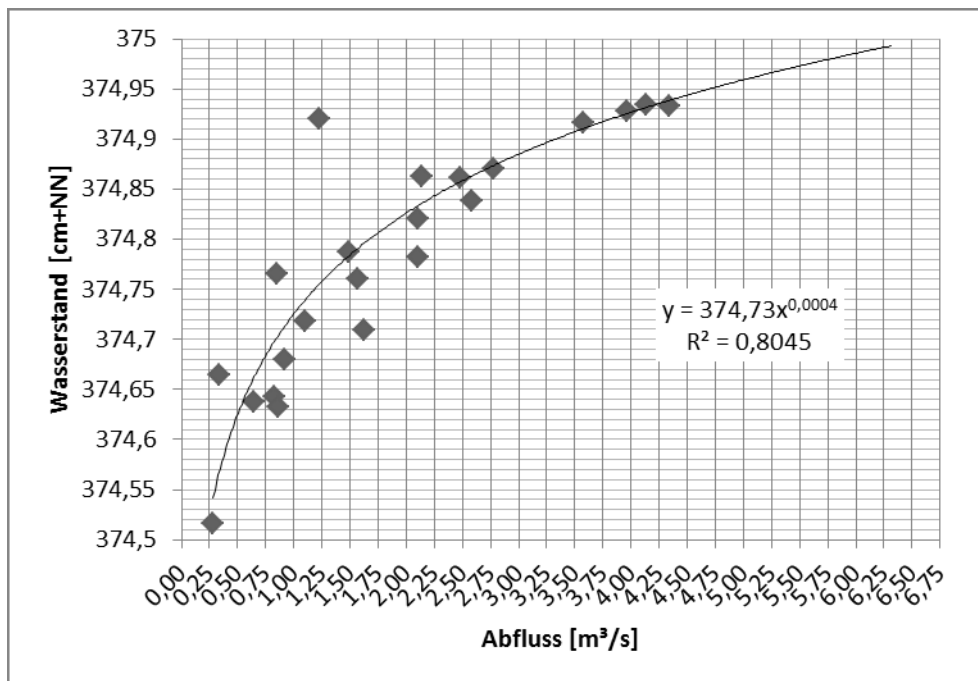


Abb. 6.1-5: W-Q-Beziehung am Pegel P 01 „Trogbrücke“ (gültig bis 2012).

Aus den von der W-Q-Beziehung abgeleiteten Durchflüssen für den Pegel an der „Trogbrücke“ P 01 (maßgeblich für die Wassermenge, die weiter in den Auwald fließt) und über das Ausleitungsbauwerk OHB lassen sich folgende gewässerkundlichen Hauptzahlen für den OHB in der Tabelle 6.1-4 berechnen. Unterschiede in den Kennzahlen (P 01, „Trogbrücke“, eigene Messung und Ausleitungsbauwerk OHB, Daten WWA Ingolstadt) ergeben sich einerseits aus den unterschiedlichen Geräten, der Methode, des Zeitraumes und der Lage der Station bei den Messungen.

Unberücksichtigt bleiben allerdings die erhöhten Abflüsse während einer ÖF. Da keine belastbaren Schlüsselkurven für weitere Standorte aufgestellt werden konnten (siehe Kapitel 5.1.1.2), fehlen auch Angaben für den weiteren Verlauf. Stattdessen wurden über die Wasserstände am Pegelstandort „Wegekreuzung“ (P 03) entsprechende Kennzahlen berechnet. Dieser Standort kann als „Leitpegel“ angesehen werden, da hier die kompletten Wassermengen der ÖF mit berücksichtigt werden.

Unter einer vereinfachten Annahme, dass die Größe der häufigsten Hochwasserabflüsse die Tiefe und Breite eines Gewässerbettes und den Abstand von Sohlstrukturen bestimmt, kommt dem MHQ bzw. dem MHW besondere Bedeutung zu. Dieser kann in grober

Annäherung dem bordvollen Abfluss gleichgesetzt werden. Nach einer Abflussmessung an der „Wegekreuzung“ am 06.02.2013 mit 23,4 m³/s kann dieser in vereinfachter Annäherung mit 25 m³/s für den OHB angenommen werden und tritt mehr oder weniger während einer ÖF auf. Beim mittleren Abfluss kann nach verwendeter W-Q-Beziehung und Datenreihe von etwa 2,6 m³/s ausgegangen werden, wenn zu dem berechneten Mittelwert von 2,1 m³/s (Tabelle 6.1-4) die Ausleitungsmengen der ÖF dazu gerechnet werden.

Tab. 6.1-4: Gewässerkundliche Hauptzahlen (Monatswerte) OHB nach WWA-Daten (Pegel Ausleitungsbauwerk OHB) und eigene Messungen (Pegel P01 „Trogbrücke“ und P03 „Wegekreuzung“).

Hydrologische Daten	Abfluss Q [m ³ /s]	Wasserstand W [m]	Ausleitungsbauwerk OHB WWA-IN (15.07.2011-19.07.2013) in [m ³ /s]	P01 Trogbrücke (09.06.2010-19.07.2013) in [m ³ /s]	P01 Trogbrücke (09.06.2010-19.07.2013) in [m]	P03 Wegekreuzung (09.06.2010-19.07.2013) in [m]
Niedrigster Wert im Monat	MoNQ	MoNW	1,0	0,2	374,22	372,05
Mittlerer niedrigster Wert im Monat	MoMnQ	MoMnW	2,0	1,1	374,68	372,43
Mittelwert	MQ	MW	3,0	2,1	374,80	372,61
Mittlerer höchster Wert im Monat	MoMHQ	MoMHW	4,1	3,5	374,90	372,91
Höchster Wert im Monat	MoHQ	MoHW	6,1	6,0	375,11	274,05

Einen Überblick über den Beobachtungszeitraum von 1136 Tagen (09.06.2010-19.07.2013) gibt Abbildung 6.1-6. Tagesmittel werden als Ganglinien und Häufigkeitsdiagramme, Monatsmittel als Box-Plots präsentiert. Statt des Durchflusses, wie sonst üblich, wurden aus den bereits genannten Gründen die Wasserstände als Variable herangezogen. Bei dem Vergleich mit der Abbildung 6.1-2 fallen die Schwankungen bei den niedrigen Wasserständen auf. Das Jahr 2011, welches bei der Donau eher von niedrigen Abflüssen gekennzeichnet war, zeigt bei den Wasserständen am OHB höhere Werte als die Jahre 2012 und 2013 (Abbildung 6.1-6 A). Im Sommer 2012 kann eine mögliche Sohlteferlegung nicht ausgeschlossen werden. Bei den mittleren monatlichen Schwankungen, (Abbildung 6.1-6 B) fallen die im Vergleich zur Donau höheren Schwankungen im Februar und Oktober auf, sowie die extrem geringen Schwankungen im April und Mai. Die Verteilung der Häufigkeiten zeigt einen auf beide Seiten streuenden Wertebereich. Es treten häufiger auch geringere Wasserstände auf als niedrige Abflüsse an der Donau im gleichen Zeitraum (vgl. Abbildung 6.1-2 C).

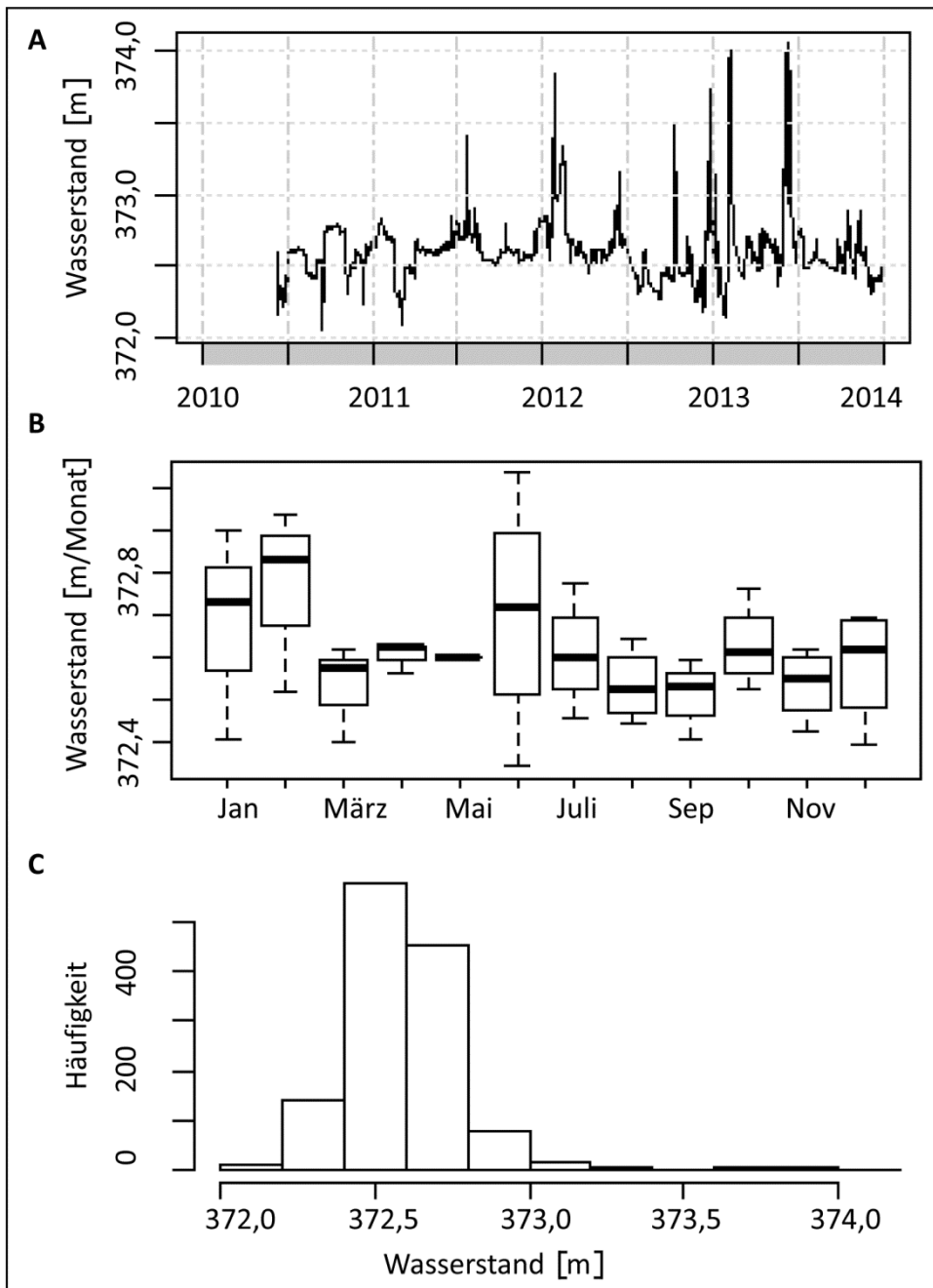


Abb. 6.1-6: Tagesmittelwerte (A), Schwankungen der mittleren monatlichen Wasserstände (B) und Häufigkeitsverteilung einzelner Wasserstände (C) (OHB P 03, 2010 bis 2013).

Während die Amplituden der Wasserstandsschwankung, die steuerungsbedingt von der Ausleitungsmenge geprägt werden, bei „Normalbetrieb“ und bei einer ÖF grundsätzlich entlang des OHB (in der Abb. 6.1-7 von oben (Pegel P02) nach unten (P16)) flussabwärts abnehmen, ist der Einfluss bei natürlichen Hochwassern genau gegenläufig (Abb. 6.1-7, Trendlinien). Vergleicht man das Juni-Hochwasser 2013 mit dem Hochwasser im August 2010, so fällt nicht nur das um fast 1,5 m höhere Schwankungsniveau auf, sondern auch das zum Teil gegenläufige Oszillieren der maximalen Schwankungen von Pegel zu Pegel. Dies hängt einerseits mit den standortspezifischen Verhältnissen (hydrologische Anbindung und

Lage) sowie den besonderen Rückstauprozessen im PG zusammen (weitere Ausführungen folgen im Kapitel 7).

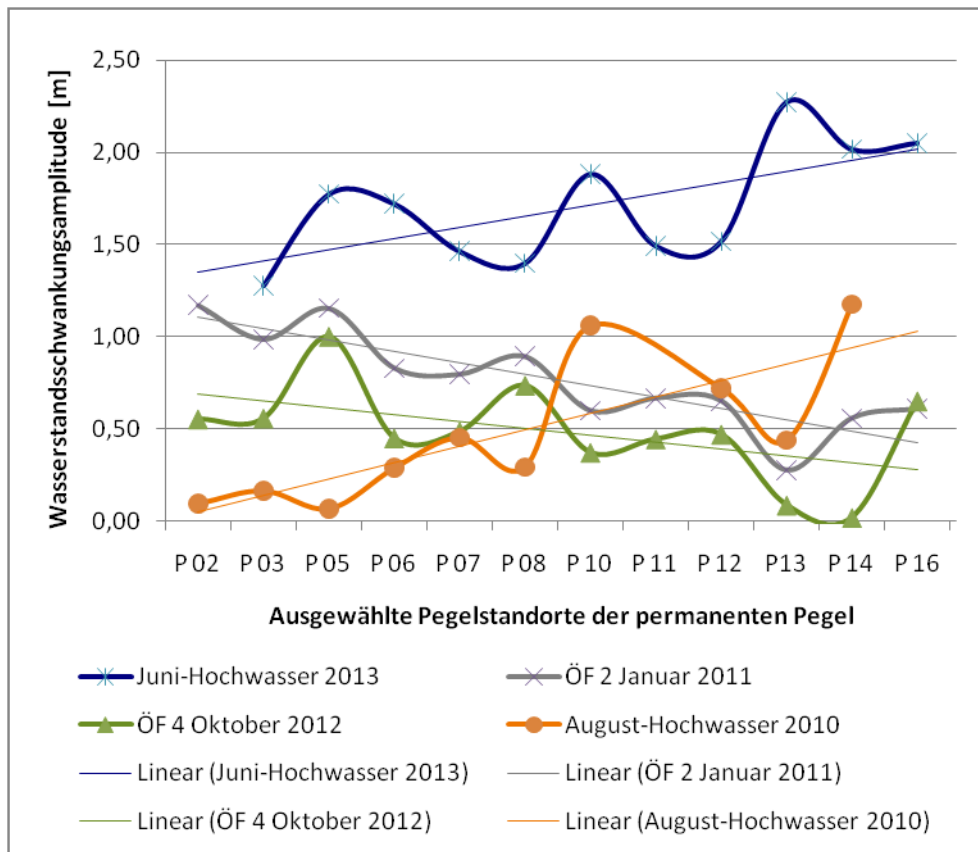


Abb. 6.1-7: Wasserstandsschwankungsamplituden (berechnet auf Basis von Tagesmittelwerten) entlang des OHB während Hochwasser und ÖF an ausgewählten Pegelstandorten (09.06.2010-19.07.2013).

Bei der Betrachtung des Gesamtzeitraums (Tab. 6.1-5) zeigt P 01 („Trogbücke“) nur die Wasserstandsdynamik des OHB mit 0,89 m (Tagesmittelwerte), während bei Pegel P03 („Wegekreuzung“) die Dynamik der ÖF erfasst werden kann (Aufnahme der Ausleitungsmengen bei einer ÖF über die beiden Flutmulden, Abb. 4-2). Die Wasserstandsschwankungsamplitude (WSA) beträgt hier 2 m. Bei Pegel P 07 („Pionierbrücke“) sind es aufgrund der flacher auslaufenden Ufer nur noch 1,73 m. Ab hier nehmen die Schwankungen durch den stärker werdenden Einfluss der Donau und den Rückstau in den OHB hinein wieder zu und erreichen beim Pegel P 14 („Mündung“) die größten WSA von 2,99 m (Tab. 6.1-5). In anderen Auengewässern und OHB- Rückstaubereichen treten sowohl kleinere als auch größere Schwankungen im Wasserstand auf.

So sind bisher Wasserstandsschwankungen im Ottheinrichbach von maximal 2,56 m mit diesen Maßnahmen möglich (3,25 m wenn das Juni-Hochwasser 2013 mit einberechnet wird). An Pegeln außerhalb des Umgehungsgewässers sind immer noch Maximalschwankungen von bis zu 1,92 m möglich.

Tab. 6.1-5: Minima, Maxima, Mittelwerte, Wasserstandsschwankungsamplituden (Max-Min, grau unterlegt) und Standardabweichung (berechnet auf Basis von Tagesmittelwerten) an den Pegelstandorten der stationären Pegel (14.04.2010 bzw. 09.06.2010-19.07.2013).

Pegel	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09
Min	374,22	373,18	372,05	370,76	371,43	371,30	371,09	371,04	371,01
Max	375,11	374,83	374,05	372,43	373,56	373,44	372,82	372,82	373,24
MW	374,80	373,55	372,61	371,30	371,88	371,74	371,50	371,44	371,05
Max-Min	0,89	1,66	2,00	1,66	2,13	2,14	1,73	1,78	2,23
SD	0,10	0,18	0,22	0,25	0,27	0,24	0,19	0,23	0,16
Pegel	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	P 16	P 17	P 18
Min	370,11	369,97	369,39	369,14	368,35	372,34	369,08	369,22	371,28
Max	372,38	372,39	371,87	371,80	371,34	374,21	372,06	372,94	372,99
MW	370,81	370,81	370,16	369,50	369,07	373,01	369,81	370,04	371,68
Max-Min	2,27	2,42	2,49	2,66	2,99	1,87	2,98	3,72	1,70
SD	0,23	0,28	0,27	0,25	0,29	0,32	0,41	0,43	0,27

Da bei gleichem Wasserstand, aber zunehmendem (beschleunigtem) Abfluss im FG ein größerer und bei abnehmendem (verzögertem) Abfluss ein geringer Abfluss, aufgrund des veränderten Wasserspiegelgefälles, zu beobachten ist, sind die Wasserstände während ÖF besonders zu berücksichtigen. Beim Ablauf von Wellen, die durch ÖF erzeugt werden, wird dieser Hystereseffekt allerdings zusätzlich von Rückstauwirkungen überlagert. Im Bereich der drei Anbindungen staut sich das Wasser und fließt nur eingeschränkt oder zeitlich stark verzögert in die Donau.

In der Abbildung 6.1-8 sind der Wasserstand, die mittleren Wasserstandsniveaus und die Wasserstandsschwankungen der stationären Pegel zusammenfassend in Box-Plots dargestellt. Neben dem P 15 (Zeller Kanal) fallen deutlich die beiden Pegelstandorte der Stillgewässer (P 04, Kleiner Schlossweiher und P 18, Albenschüttweiher) auf. Ihr mittleres Wasserspiegelniveau liegt deutlich unter den benachbarten Pegeln. Bei P 01 sind nur geringe Schwankungen vorhanden, da dieser, wie bereits erwähnt, von den ÖF „entkoppelt“ ist und nur die Schwankungen des OHB abzubilden vermag. Zudem wird die nach oben begrenzte Schwankungsmöglichkeit durch eine maximale Ausleitungsmenge ersichtlich. P 09 reagiert an der Brücke B 4 (Abb. 4-17) ausschließlich bei ÖF bzw. bei Hochwasser, wenn aufgrund höherer Abflüsse in der Donau Wasser in die „temporäre Rückleitung ÖF“ fließt. P 11 und P 12 sind deutlich durch die GWA geprägt, dieser Effekt lässt sich bei P 13 nicht mehr nachweisen. P 14 hat (wie auch in Abb. 6.1-9 später ersichtlich) durch den Donaueinfluss eine besonders hohe Streuung.

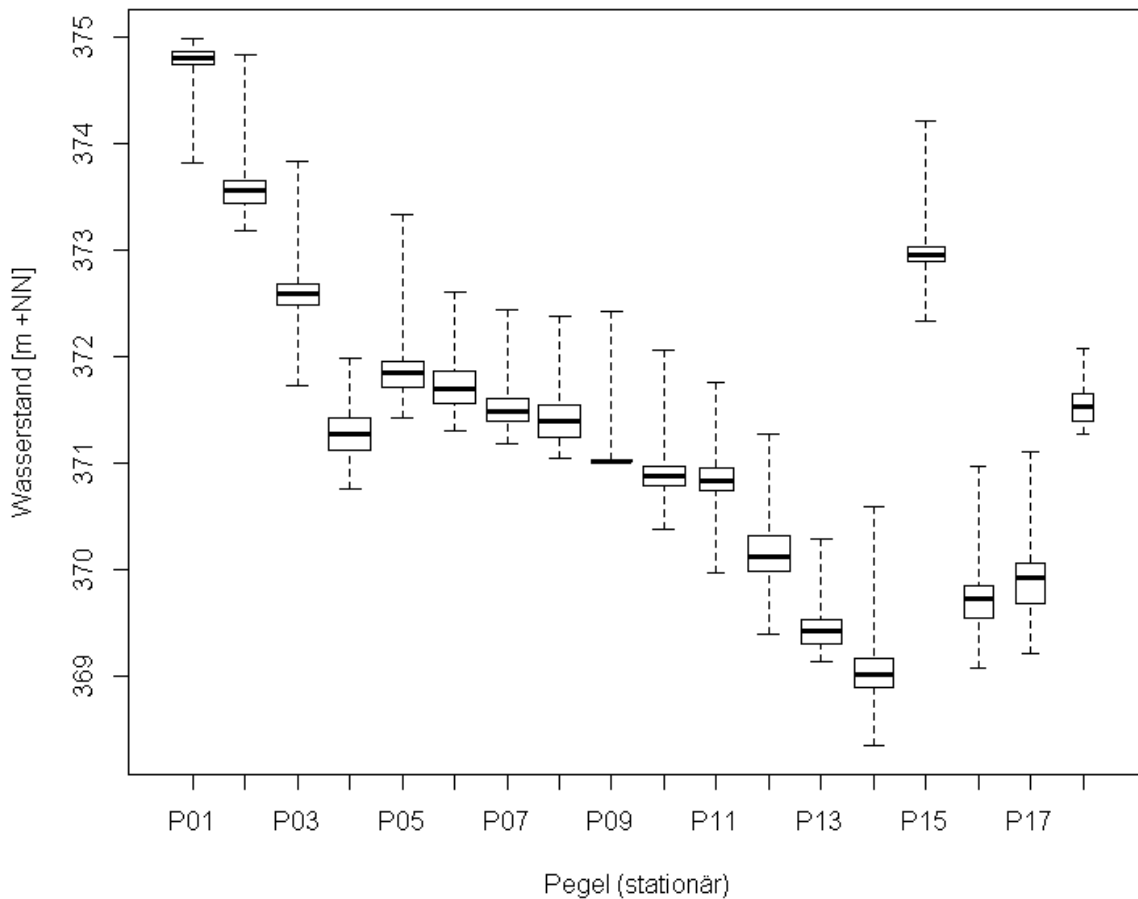


Abb. 6.1-8: Box-Plot-Diagramme der stationären Fließgewässerpegel am OHB und Zeller Kanal (P 15) sowie der beiden Stillgewässerpegel am „Kleinen Schlossweiher“ (P 4) und Albenschüttweiher (P 18) über NN (14.04.2010-19.07.2013).

Der Verlauf mancher Ganglinien in der Abbildung im Anhang 6.1-2 ist annähernd parallel. In der in Abbildung 6.1-9 getroffenen Auswahl lässt sich auch noch eine gewisse Ähnlichkeit erkennen, die über die euklidische Distanz als Ähnlichkeitsmaß auch belegt werden kann (Tab. 6.1-6). Dabei weist der Vergleich der Ganglinie des Kleinen Schlossweihers P 04 mit dem P 05, mit dem kleinsten Wert (18,43), die stärkste Ähnlichkeit auf. Auch bei der Gegenüberstellung von P 05 mit den beiden Pegeln P 12 und P 13 fällt auf, dass ein geringer Wert für die euklidische Distanz (knapp über 21) eine größere Ähnlichkeit aufweist, als beispielsweise der räumlich näher gelegenen Pegel P 03. Je nach Standort und Ereignis treten jedoch durchaus Unterschiede in der Reaktion auf, die jeweils ereignisabhängig diskutiert werden müssen.

Tab. 6.1-6: Distanz- bzw. Ähnlichkeitsmaßzahl (euklidische Distanz) ausgewählter Pegelstandorte (09.06.2010-19.07.2013).

	P01	P03	P04	P05	P12	P13	P14
P01		35,49	44,39	41,99	42,20	46,80	49,07
P03			32,17	22,71	29,99	34,29	34,49
P04				18,43	28,20	22,41	37,82
P05					21,09	21,69	33,87
P12						24,06	30,80
P13							30,41
P14							

Mehrere Schlussfolgerungen können aus der Analyse der Daten abgeleitet werden und lassen sich an den Ganglinien in Abb. 6.1-9 anschaulich erklären (cm-Angaben beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf Tagesmittelwerte). Die Nummerierung der folgenden Stichpunkte bezieht sich auf die Ziffern in Abb. 6.1-9:

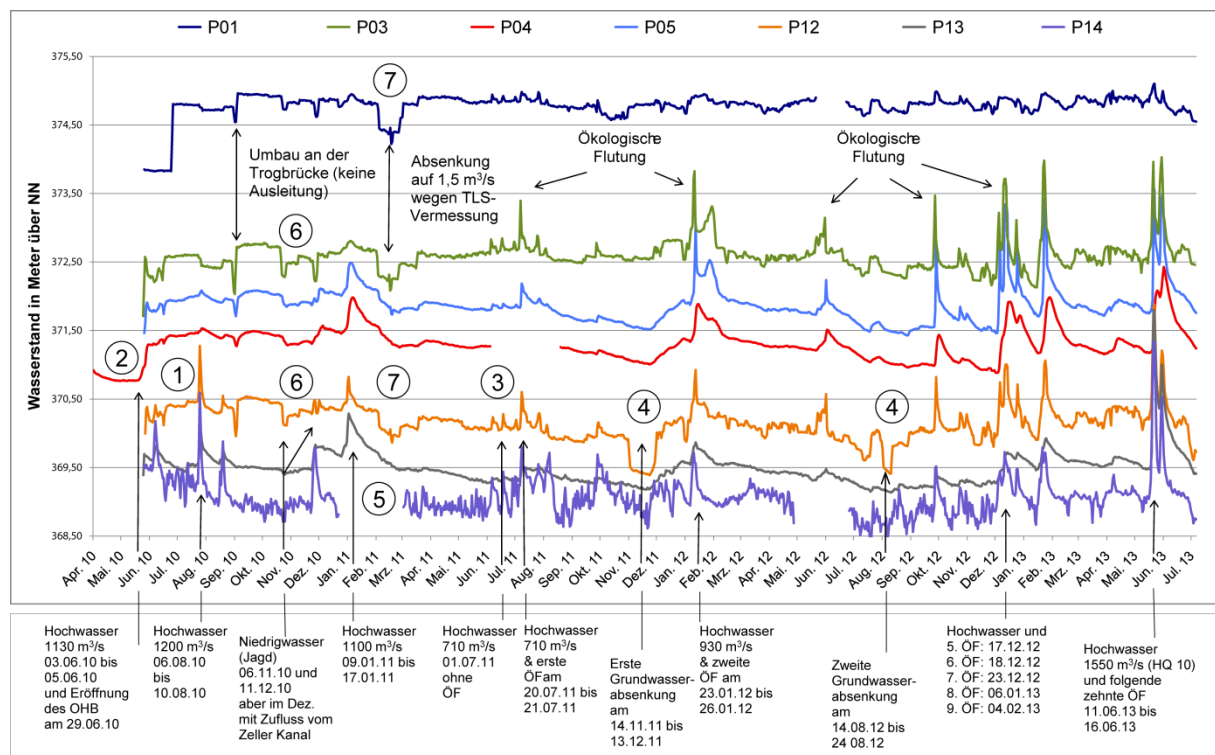


Abb. 6.1-9: Ganglinien der stationären (permanenten) Fließgewässerpegel (Tagesmittelwerte) am OHB und der Stillgewässerpegel am „Kleinen Schlossweiher“ (rote Linie) (10.04.2010-19.07.2013, Pegelstandorte Abb. 4-2). Wichtige natürliche oder anthropogene Ereignisse (Wasserbau, wiss. Testphasen etc.) sind mit Pfeilen markiert und benannt. Die unterste Ganglinie (P 14) entspricht etwa dem Donauwasserstand. Die Erklärung der Ziffern folgt im Text.

1. Durch die Wiederanbindung bestehender Gewässer und des UG_{Gew} an die Donau führen auch kleine bis mittlere natürliche Hochwasser ($>700 \text{ m}^3/\text{s}$) über Rückstaueffekte zu einer Dynamik der Wasserstände im UG und UG_{Gew} (Pegel P 12, August-Hochwasser 2010). Am Pegel P 12 konnte während des Hochwassers ein Wasserstandsanstieg von 80 cm gemessen werden, diese Auswirkung lässt sich auch noch über 2,5 km OHB-aufwärts beim Pegel P 05 mit 7 cm nachweisen. Die hydrologische Konnektivität zwischen Donau und Aue wurde über diese Wiederanbindung und Reaktivierung alter Flutrinnen teilweise wieder hergestellt.
2. Kurz nach der Inbetriebnahme des OHB konnte ein langfristiger Anstieg des Wasserspiegels von rund 60 cm am „Kleinen Schlossweiher“ (Pegel P 04) aufgezeichnet werden. Auch an den anderen Oberflächengewässern konnte eine ähnliche Reaktion beobachtet werden. Die drei größten Stillgewässer im UG reagieren sehr ähnlich und mit einer geringen Zeitverzögerung auf das Abflussgeschehen des OHB. Üblicherweise verlaufen Wasserstandsschwankungen in Stillgewässern ruhiger (gedämpfter), während sie im Fließgewässer stärker schwanken und einen unruhigeren Verlauf zeigen. Ab Pegel P 05 kurz vor dem „Wetterloch“ ist auch die Dynamik im OHB deutlich weniger ausgeprägt als bei den ersten drei Pegelstandorten. Die stillgewässerähnlichen Verhältnisse rund um den Albenschüttweiher lassen sich in den Ganglinien nachvollziehen. Ab Pegel P 12 wird der Einfluss der Donau über die „1. Rückleitung“ deutlich und die Ganglinien werden wieder zittriger im Verlauf.
3. Beim Vergleich des Hochwassers vom 01.07.2011 mit der ersten ÖF am 20.07.11 mit jeweils $710 \text{ m}^3/\text{s}$ (Peak), wird deutlich, dass ÖF noch mehr Dynamik in den Wasserständen erzeugen können als kleine und mittlere natürliche Hochwasserereignisse ohne Flutung. Auch hier ergeben sich standortspezifische Unterschiede, so macht der Unterschied am Pegel P 12 nur 32 cm aus, während er bei Pegel P 03 noch 55 cm beträgt.
4. Im östlichen Bereich des UG, in dem die Grundwasserabsenkung wirksam sein kann (ab Pegel P 11, beim „1. Absperrbauwerk“, siehe auch Abb. 4-17), kommt es während dieser Maßnahme zu einem deutlichen Sinken des Wasserstandes. An den betroffenen Pegeln lassen sich im OHB, aber auch an den Auengewässern der näheren Umgebung sowie den Grundwassermessstellen die Wirkung der Maßnahme nachvollziehen.
5. Am Pegelstandort P 14 zeigt der stark schwankende Verlauf die Auswirkungen des Schwellbetriebs der Staustufe Ingolstadt. Der Einflussbereich reicht über die „Alte Donau“ weit nach Süden und erreicht damit auch donauferne Standorte im Auwald. Über Rückstau und Rückströmung werden die hydrologischen Verhältnisse des OHB von der Donau überprägt. An über 1 km von der Donau entfernten Standorten (Pegel P 13) und darüber hinaus lassen sich diese Effekte nachweisen.
6. Im November 2010 lässt sich bei reduzierter Ausleitungsmenge ein Abfall der Wasserstände bis zum Pegel P 13 nachvollziehen. Bei gleicher Ausleitungsmenge im Dezember 2010 wird über den Zufluss vom Zeller Kanal ein Absinken verhindert. Auch hier ist über den Rückstau eine Auswirkung bis zum Pegel P 05 zu messen. Der Einfluss des Zeller Kanals ist insbesondere bei erhöhter Wasserführung (meist im Januar/Februar) deutlich. Während bei diesen Verhältnissen der ZK den OHB beeinflusst, dreht sich das Verhältnis während einer ÖF um und der Zeller Kanal wird vom OHB zurückgestaut.

7. Die Abflussdynamik des OHB (ohne ÖF) lässt sich am Pegel P 01 zeigen. Am Verlauf der Ganglinie ist neben der automatischen auch die manuelle Steuerung abzulesen. Gerade die von der Donau entkoppelte, verringerte Abflussregulierung (bei manueller Steuerung) ist über das ganze Fließgewässer bis zum Pegel P 12 wirksam.

Die hydrologischen Verhältnisse im restlichen UG können über das temporäre Pegelsystem, die Pegel der E.ON Wasserkraft GmbH und des WWA Ingolstadt nachvollzogen werden. Auswertungen für verschiedene Auengewässer zeigen eine deutliche Dynamisierung der Wasserstände. Diese Auswirkungen erstrecken sich meist weit über den direkten Einflussbereich des FG (schematische Darstellung in Abb. 4-2) und wirken sich auch auf die Dynamik und den Verlauf der Ganglinien von diversen Grundwassermessstellen aus (siehe dazu FISCHER und CYFFKA (in press)).

Hydrologische Ereignisse, die die hydrologische Konnektivität in all ihren Ausprägungen (longitudinal, lateral, vertikal und temporal) und die Wirkungskette im Auensystem verdeutlichen, wurden bereits bei FISCHER und CYFFKA (in press) gezeigt. Zwei dieser Einzelereignisse, die besonders zum Verständnis des Abflussgeschehens beitragen, sollen im Folgenden (I-II) auch hier näher erläutert werden:

I: In der Abbildung 6.1-10 sind für den Zeitraum der siebten und zweitlängsten ÖF mit etwas mehr als vier Tagen (Tab. 6.1-1) und einem Gesamtzeitraum (inkl. Steuerung des Drosselbauwerks) von über acht Tagen (23.12.2012 bis 31.12.2012) die Wasserstände der temporären Pegel (tPÖF) in Ganglinien aufgetragen. Deutlich sind die Steuerungen an den einzelnen Bauwerken in den Verläufen der Ganglinien abzulesen: der Anstieg (A) mit der maximalen Amplitude, das Schließen des „Ausleitungsbauwerks ÖF“ (B) und der Abfall (C) nach dem Öffnen des „Drosselbauwerks“ am Längenmühlbach.

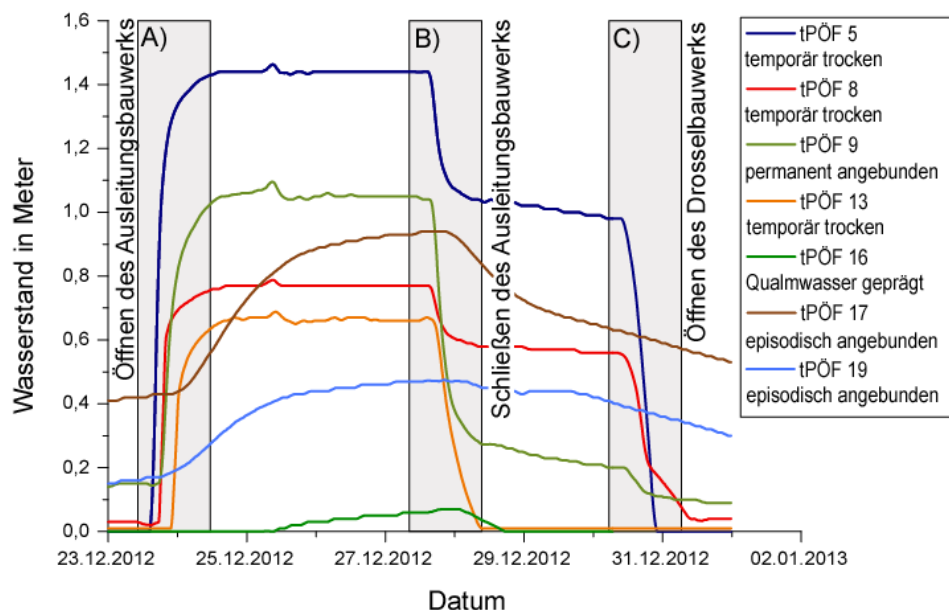


Abb. 6.1-10: Ganglinien der temporären Pegel für den Zeitraum der siebten ÖF (vom 23.12.2012 bis 31.12.2012). Grau hinterlegt von links nach rechts: A) Öffnen des „Ausleitungsbauwerks ÖF“, B) Schließen des Bauwerks C) Öffnen des „Drosselbauwerks“ am Längenmühlbach (zu den Pegelstandorten siehe Abb. 4-2).

Die sofort auffallende Plateauphase, die sich im Zeitraum vom 24.12.2012 bis zum 28.12.2012 einstellt, liefert eine wichtige Erkenntnis und zeigt, dass der Wasserstand aufgrund der begrenzten Ausleitungsmenge von $30 \text{ m}^3/\text{s}$, unabhängig von der Dauer einer ÖF, nicht mehr weiter zunimmt (Abb. 6.1-10). Dieses markante Verhalten konnte durch zahlreiche weitere Messungen während anderer Flutungen (ÖF 2, ÖF 9, ÖF 10, vgl. FISCHER und CYFFKA (2014)) verifiziert werden. Daraus lässt sich bereits an dieser Stelle die Schlussfolgerung ziehen, dass die Dauer einer ÖF in der momentanen Ausbau- und Steuerungskonfiguration (Gewässerdimensionierung, Abflusskapazität, Steuerung der Ausleitungsmengen (zeitlich und mengenmäßig)) mit dem entsprechend vorherrschenden Donauwasserstand fast keine Auswirkung auf die Ausbreitung der Flutungsflächen hat und diese im Rahmen der planfestgestellten Möglichkeiten nicht weiter vergrößert werden können!

Je nach hydrologischer Anbindung an LMB, OHB oder an die Donau reagieren die Auengewässer unterschiedlich: Am 25.12.2012 konnte an mehreren Pegelstandorten ein kleiner Peak aufgezeichnet werden, der auch bei den Pegeln der Donau aufgezeichnet wurde (vgl. HOCHWASSERNACHRICHTENDIENST 2013). Sowohl im Fließgewässersystem des LMB (tPÖF 5 und 8) als auch im OHB (tPÖF 9) sowie am temporären Pegel ÖF 13 (FG-System OHB-Donau) lässt sich dieser Peak wiederfinden. An den Pegeln weiter östlich (nicht mehr in der Abbildung) ist diese kurze Abflussspitze nur noch sehr gedämpft und zeitverzögert zu sehen. Damit lässt sich der Donaueinfluss über die beiden Ausleitungsbauwerke (auch bei P 01 „Troglbrücke“) hinweg erkennen und zeigt, dass das Wasservolumen im Stauhaltungsstau der Staustufe Bergheim (bei Hochwasserspitzen) auch einen, wenn auch kleinen, Einfluss auf die Verhältnisse im Auwald hat.

Sowohl permanent angebundene als auch die für das Projekt typische temporär angebundene Standorte, die nach einer Flutung schnell wieder trocken fallen (temporär trocken, künstl Flutungsfläche, Abb.4-4), ist die schnelle und unmittelbare Reaktion auf die Steuerung der Abflussmengen über die jeweiligen Ausleitungsbauwerke gemein. Ein Beispiel hierfür sind die Pegelstandorte tPÖF 5 und 8. Die Standorte gehören zum FG-System des LMB und sind temporär, also nur während einer ÖF, mit dem FG verbunden und fallen nach einer Flutung wieder trocken. Pegel tPÖF 8, dem Standort in der unteren Flutrinne entsprechend, reagiert mit einer kürzer abfallenden Phase nach dem Schließen des Ausleitungsbauwerks und einer zusätzlichen Verzögerung (Knick am unteren Ende der Ganglinie) nach Öffnen des Drosselbauwerks. Diese Verzögerung wird durch das Auslaufen der Flutrinne hervorgerufen. Diese schnell reagierenden Pegel sind nicht mit den episodisch angebotenen Gewässern (Plesiopotamon) zu verwechseln. Pegelstandort tPÖF 9 repräsentiert einen permanent angebotenen Altarm (Parapotamon), der über Rückstauprozesse angebotnen ist (Abb. 6.1-10). Pegel, welche nur indirekt an die FG im UG angebotnen sind, also dem Plesiopotamon oder Paläopotamon entsprechen, reagieren deutlich verzögert, auch dann mit steigendem Wasserstand, zeigen aber insgesamt einen ganz anderen Kurvenverlauf. z.B. wenn sie erst nach deutlichem Anstieg in der „Alten Donau“ und Flutung einer Senke mit Wasser in Kontakt kommen (vgl. Pegel tPÖF 19). Hier ist die Steuerung der Bauwerke kaum noch im Verlauf der Ganglinien abzulesen, auch

Reaktionen bei plötzlichen Änderungen werden nicht abgebildet. Noch später reagieren die Pegelstandorte tPÖF 16 und 17 bei Anstieg des Grundwassers durch Qualmwasser in Senken und Muldenstrukturen. Je nach Dauer, bzw. Wasserstand kann es auch zu diversen Übergangsformen kommen, wenn z. B., wie bei tPÖF 17, erst über Qualmwasser, später dann oberflächlich eine Verbindung mit dem OHB erfolgt (Abb. 6.1-10).

II: Im Sommer 2013 konnten durch den direkten Übergang vom Juni-Hochwasser in die zehnte ÖF die beiden Ereignisse gut verglichen werden. Anhand ausgewählter temporärer Pegel (Abb. 6.1-11) können Unterschiede zwischen gesteuerten und ungesteuerten Flutungen herausgestellt werden. Bevor die Detailbetrachtung erfolgt, sollen hier, wie bei FISCHER und CYFFKA (in press), nur stichpunktartig die wichtigsten Ergebnisse aufgeführt werden:

Bei allen Pegeln ist deutlich der Unterschied zwischen dem annähernd natürlichen Verlauf (Überlauf über das Streichwehr) während einer „natürlichen Flutung (NF)“, wie hier während des Juni-Hochwassers 2013, und der anschließenden Ökologischen Flutung (gesteuerte Flutung) zu sehen. Der Verlauf der Ganglinien beim Hochwasser ist durch einen relativ steil ansteigenden und steil abfallenden Ast gekennzeichnet. Hier drückt sich die Wirkung der auf einen bestimmten Wasserstand ausgelegten Überlaufschwelle aus, was ein eher abruptes Anspringen und ebenso plötzliches Auslaufen nach sich zieht. Bei der Flutung lässt sich an den bereits bekannten Pegelstandorten wieder der charakteristische stufenförmige Verlauf mit einer Plateauphase erkennen (vgl. Abb. 6.1-10).

Die Peaks (Maximalwasserstände) an den Pegelstandorten sind beim Hochwasser zwischen 5 cm und 90 cm höher als bei der ÖF. Im Unterschied zu allen bisher registrierten ÖF sind damit standortabhängig deutlich höhere Maximalwasserstände erreicht worden. Für die ÖF 10 konnte ein durchschnittlicher maximaler Wasserstand von 1,20 cm errechnet werden. Dieser liegt für das Hochwasser 2013 noch um 37 cm höher. Da zudem die ÖF 10 noch durch das Hochwasser beeinflusst ist, sind im Vergleich mit anderen Flutungsereignissen noch höhere Unterschiede zu erwarten.

Ein Unterschied zwischen den einzelnen Pegelstandorten lässt sich besonders gut bei gesteuerten Flutungen nachweisen, während bei einem natürlichen Hochwasser der Verlauf insgesamt gleichmäßiger ist. An Auengewässern gleichen Typs (Eu-, Para-, Plesi-, oder Paläopotamon) reagiert der Wasserstand bei den Ereignissen ähnlich und die Ganglinien verlaufen nahezu parallel. Ähnliche Ganglinienverläufe an unterschiedlichen Standorten konnten festgestellt werden (siehe unten).

Die Zuordnung der Pegel in der Abbildung 6.1-11 zu den FG-Systemen Längenmühlbach, Ottheinrichbach, Donau, Zeller Kanal, Drainagegraben sowie zu den grundwasserbeeinflussten Standorten aus der Abbildung 4-2 hilft bei der Betrachtung und Interpretation der Ganglinien.

Abbildung 6.1-11 A: Während sich hier (FG-System LMB und OHB) ein deutlicher Einfluss der Steuerung des „Ausleitungsbauwerks ÖF“ und des „Drosselbauwerks“ abzeichnet, der bereits in Abbildung 6.1-10 besprochen wurde (vgl. tPÖF 8), verliert dieser Einfluss im weiteren Verlauf vom OHB in Richtung Donau an Einfluss. Der markante stufige Verlauf

sowie die Plateauphase (vgl. auch Abb. 6.1-10) werden bereits in 6.1-11 B zugunsten eines meist etwas gleichmäßigeren Abfallens der Wasserstände nach der ÖF geprägt. Der Unterschied zwischen NF und ÖF ist hier in Abbildung 6.1-11 A am deutlichsten ausgeprägt und auch die schnelle Reaktion (relativ steil ansteigender und abfallender Ast) bei Hochwasser.

Abbildung 6.1-11 B: Beim tPÖF 1, welcher in der Nähe vom „Ausleitungsbauwerk für ÖF“ in einer sonst trockenen Flutrinne steht, wird besonders beim abfallenden Ast der beiden Ereignisse eine zu den anderen Standorten merkbare Verzögerung deutlich. Ähnlichkeiten im Verlauf lassen sich bei anderen Flutrinnenstandorten (tPÖF 11 und 20) finden. Je nach Anbindung fallen die Flutrinnenstandorte schneller oder langsamer trocken.

Der temporäre Pegel ÖF 7 ist zwar nicht in einer Flutrinne positioniert, da er am Rand des OHB in einer potentiellen Überflutungsfläche steht, zeigt aber, wie tPÖF 11, auch keine Reaktion auf das Öffnen des „Drosselbauwerks“. Wird dieses geöffnet, befindet sich schon kein Wasser mehr auf dieser Fläche (und in der Flutrinne am tPÖF 11). Am Standort des tPÖF 7 wird beispielhaft das relativ kurze Ausufer des OHB gezeigt und liefert einen Zeitwert für die Überflutungsdauer von 33 Stunden für das Juni- Hochwasser und 65 Stunden für die ÖF, die nach Tabelle. 6.1.1 eine Dauer von 95 Stunden hatte.

Abbildung 6.1-11 C: Es folgt die Darstellung der Ganglinien der episodisch angebundenen und durch Qualmwasser geprägten Auengewässer, also von Standorten, die etwas entfernter von den FG liegen. Trotz der Entfernung zu den FG lässt sich teilweise, wie am Pegel tPÖF 16, ein Donaeinfluss ablesen. Während einerseits die deutlich höheren Wasserstände bei Hochwasser auffallen, gibt der steile Abfall bei tPÖF 16 hier einen Hinweis auf die Sogwirkung und den Einfluss der Donau an diesem Standort, der insbesondere bei der ÖF noch vor dem Schließen des Ausleitungsbauwerks durch einen schnellen Abfall deutlich wird (vgl. hierzu Abbildung 6.1-11 A und die Reaktion der einzelnen tPÖF am 14.06.2013).

Während der Ereignisse (NF und ÖF) haben sich an diesen Standorten temporäre Auengewässer gebildet, die mit steigendem Qualm- und Grundwassereinfluss einen viel gedämpfteren und gleichmäßigeren Verlauf zeigen als die bisher betrachteten Standorte. Hier verbleibt meist auch noch Tage nach einem Ereignis eine Restwassermenge in den Senken und Muldenstrukturen. Wie bereits bei Abbildung 6.1-10 angesprochen, gibt es auch diverse Übergänge (tPÖF 17).

Abbildung 6.1-11 D: Es bleiben die episodisch angebundenen Standorte übrig, die nur bei einer Flutung einen oberflächlichen, also direkten Anschluss an den OHB oder das Donausystem haben, sonst aber abgekoppelt sind. Darüber hinaus werden auch noch einmal temporär trockene Typen, die aber einen ganz anderen Verlauf haben als in Abbildung 6.1-11 A oder B gezeigt. Bei der NF haben sie alle einen gleichmäßig ansteigenden und abfallenden Ast ähnlich wie in Abbildung 6.1-11 A, nur nicht so steil, was einerseits mit der Entfernung vom Streichwehr zu erklären ist, andererseits durch die Nähe zur Donau und den von ihr aus wirkenden Rückstauprozessen. Bei einer ÖF reagieren sie auch ähnlich, insbesondere tPÖF 12 und tPÖF 18. Dies ist deswegen interessant, weil der

sonst trockene Standort (tPÖF 12) in der „temporären Rückleitung für ÖF“ doch eigentlich allein über die „zweiseitige“ Anbindung (Fließrichtung vom OHB oder von der Donau) anders reagieren sollte als ein in einer Flutrinne stehender, vom Rückstaubereich des OHB beeinflusster Pegel (tPÖF 18).

Der tPÖF 13 liegt zwischen den beiden anderen in einem Rückstaubereich und zeigt bis auf den unteren Bereich ein ganz ähnliches Verhalten. Der erste Abfall jedenfalls ist nicht wie bei den Pegeln in Abbildung 6.1-11 A auf das Schließen des Ausleitungsbauwerks zurückzuführen, sondern auf den sinkenden Flusswasserstand in der Donau. Erst das zweite Abfallen, nach der Kuppe, kann mit dem Beenden der Flutung zusammengebracht werden. Hier ist bei tPÖF 12 und tPÖF 18 auch wieder der typische Verlauf zu erkennen.

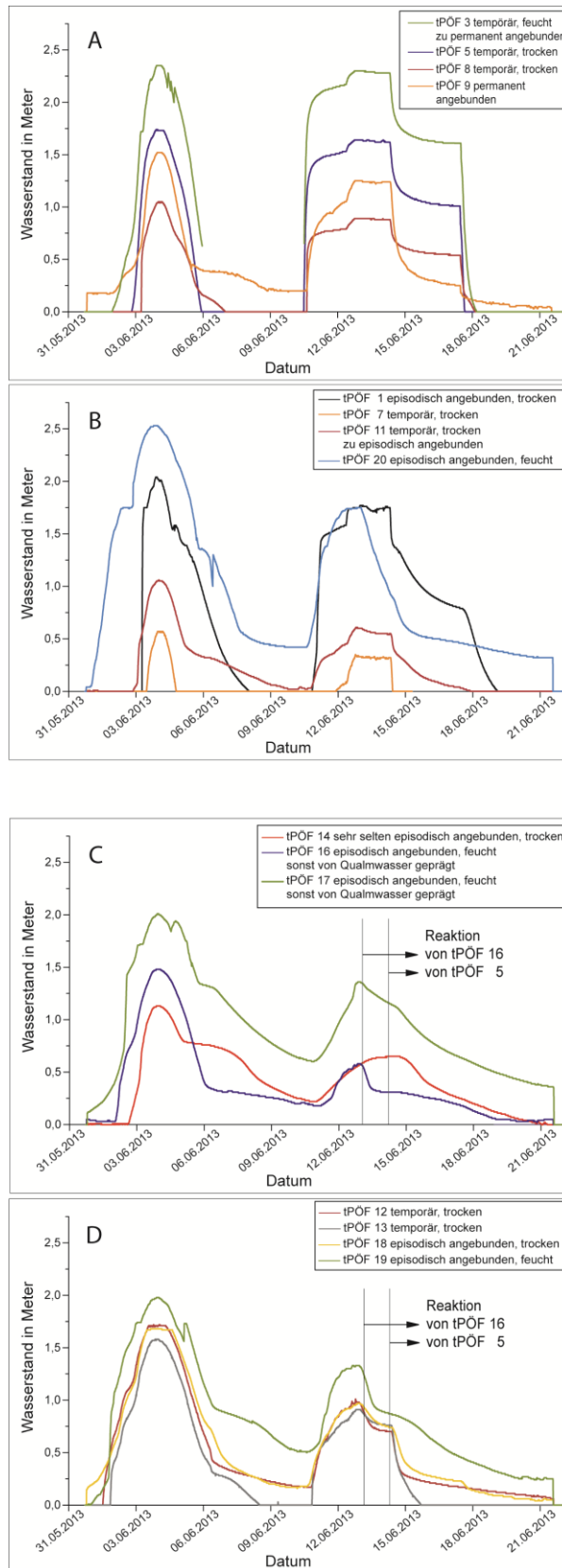


Abb. 6.1-11: Ganglinien der temporären Pegel für das Juni-Hochwasser 2013 und der zehnten ÖF, aufgeteilt nach den charakteristischen Ganglinienverläufen und Fließgewässersystemen (zum Pegelstandort Abb. 5-2).

6.1.1.4. Längenmühlbach

Der LMB dient unter anderem als Transportbahn für das bei einer ÖF ausgeleitete Wasser, und soll auch (nur) als solche in der vorliegenden Arbeit betrachtet werden. Da mit der Fließzeit vom Ausleitungsbauwerk ÖF bis zu den Flutmulden bzw. mit der Dauer bis zum Übertritt von Wasser aus dem FG-System LMB zum OHB über die Flutmulden (Kapitel 4.2 Abb. 4-17) die Wirkungsdauer (hydrologisch und morphologisch) einer ÖF entsprechend reduziert wird, ist eine Berücksichtigung notwendig. Über die Pegel BG 19 und BG 20 (E.ON AG) an den beiden Rechteckdurchlässen kann die hydrologische Dynamik bei einer ÖF nur unzureichend wiedergegeben werden, da das Log-Intervall von drei Stunden die schnellen An- und Abstiege im LMB nicht ausreichend abzubilden vermag (Abb. 6.1-12). Ein Wasserstandsanstieg von 2,46 m bei Pegel BG 19 und 2,55 m bei BG 20 zeigt auch im westlichen UG eine deutliche Wasserstandsdynamik bei der zweiten ÖF.

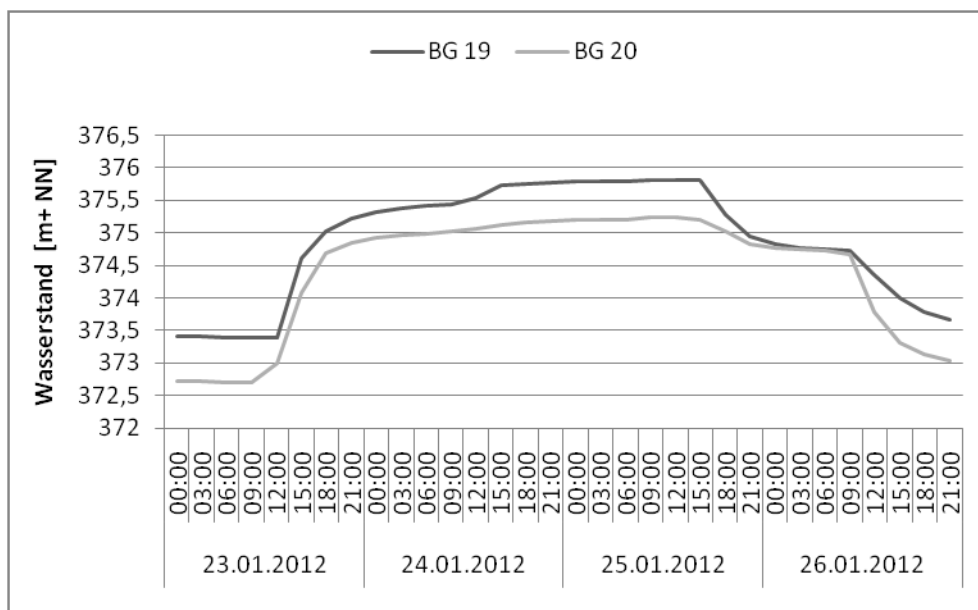


Abb. 6.1-12: Ganglinien der stationären Pegel BG 19 und BG 20 für die zweite ÖF.

Bei dem kleinen Ausschnitt der Zeitreihe lassen sich auch die einzelnen Steuerungseingriffe der Abflussregulierung bei der zweiten ÖF ablesen. Ein hoher Wiedererkennungswert zur Abbildung 6.1-10 wird schnell deutlich. Eine Erhöhung der Ausleistungsmenge von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (gesonderte Abflusssteuerung) und das anschließende Schließen des Ausleitungsbauwerks sowie das Öffnen des Drosselbauwerks erzeugen den charakteristischen Verlauf, der entsprechend der Nähe zum Ausleitungsbauwerk ÖF am Pegel BG 19 deutlicher zu sehen ist als am Pegel BG 20. Damit kann veranschaulicht werden, dass der Einfluss der Maßnahme der ÖF mit entsprechender Entfernung von den Ausleitungsbauwerken abnimmt.

Zur Analyse der Fließzeiten vom Ausleitungsbauwerk ÖF bis zur Flutmulde wurden die temporären Pegel tPÖF 2, tPÖF 3 und tPÖF 5 herangezogen. Am Beispiel der Steuerung während der fünften und sechsten ÖF wird in Tabelle 6.1-7 und Abbildung 6.1-13 die Reaktion erklärt.

Tab. 6.1-7: Steuerung der Bauwerke während der fünften und sechsten ÖF

Nummer in Abb. 6.1-13	Steuerung	Zeit	Datum
-	Schließen des Drosselbauwerks	9 Uhr	17.12.2012
1	Öffnen des Ausleitungsbauwerks	11 Uhr	17.12.2012
2	Schließen des Ausleitungsbauwerks	15 Uhr	17.12.2012
3	Öffnen des Ausleitungsbauwerks	11 Uhr	18.12.2012
4	Schließen des Ausleitungsbauwerks	7 Uhr	19.12.2012
5	Öffnen des Drosselbauwerks	9 Uhr	21.12.2012

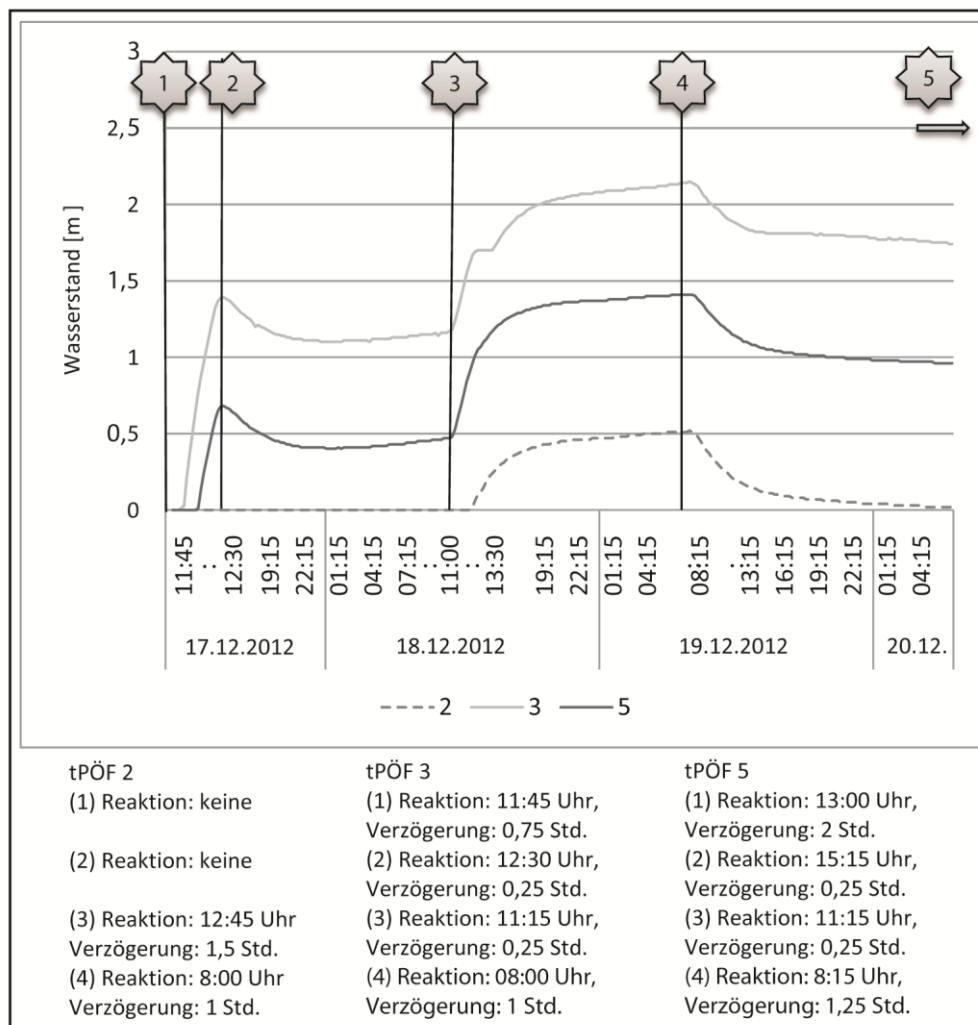


Abb. 6.1-13: Ganglinien der temporären Pegel 2, 3 und 5 für die fünfte und sechste ÖF (zu den Nummern in den Sternen siehe Nummern in Tab.6.1-7).

Für die Entwicklung während der fünften und sechsten ÖF kann eine Fließzeit vom Ausleitungsbauwerk ÖF bis zum tPÖF 3 von etwa einer dreiviertel Stunde abgelesen werden. Bis der tPÖF 5 auf der Insel reagiert, dauert es rund 2 Stunden, während der tPÖF 2 noch gar keinen Wasserstand aufzeichnet (Abb. 6.1-13). Dieser beginnt erst zu loggen, wenn Wasser über eine Schwelle läuft und die Senke füllt, in der dieser Pegel steht. Die Reaktion auf das Schließen und erneute Öffnen des Ausleitungsbauwerks ÖF verläuft sowohl bei tPÖF 3 als auch bei tPÖF 5 ohne nennenswerte Zeitverzögerung (etwa 15 min., allerdings bei schon deutlich erhöhter Wasserführung des LMB). Um diese Zeit, (gegen 13:30 Uhr) und damit rund 2,5 Stunden nach dem zweiten Öffnen des Ausleitungsbauwerks ÖF für die sechste ÖF, kommt es zum Übertritt von Wasser über die obere Flutmulde. Etwa gleichzeitig hat auch das Wasser, welches den anderen Weg über die untere Flutmulde genommen hat, die Furt an der „Wegekreuzung“ erreicht. Nach etwas mehr als einer Stunde kann auch am tPÖF 3 das Wasser weiter steigen (Stufe bei tPÖF 3). Nach dem Schließen des Ausleitungsbauwerks ÖF dauert es ebenfalls etwas über eine Stunde, bis die Pegel ein Abfallen des Wasserstandes registrieren (Abb. 6.1-13).

Über Feldbeobachtungen und weitere Pegel (Pegel tPÖF 4, tPÖF 8, sowie P 02) konnte mit den bisher berücksichtigten Ereignissen eine durchschnittliche Dauer von etwa 5,5 Stunden errechnet werden, bis es zum Übertritt von Wasser vom Fließgewässersystem des LMB über die Flutmulden zum FG-System des OHB kommt. Für die Betrachtung der morphologischen Prozesse im OHB reduziert sich die Wirkungsdauer einer ÖF entsprechend. Das ohnehin kurze „Nachlaufen“ des Wassers nach dem Schließen des Ausleitungsbauwerks ÖF dagegen muss nicht berücksichtigt werden, da durch eine relativ gleichmäßige Reduzierung nur noch mit geringen Umlagerungsprozessen zu rechnen ist.

6.1.1.5. Zeller Kanal

Der Zeller Kanal nimmt durch seine stark schwankende Wasserführung, wie zu Punkt 6 in Abbildung 6.1-9 bereits erläutert, nur während niedriger Abflussmengen im OHB Einfluss auf dessen hydrologischen Verhältnisse. Bei ÖF und entsprechendem Zufluss aus dem Donaumoos werden durch „zweifachen Rückstau“ – einerseits am Zusammenfluss durch den höheren Wasserstand im OHB, andererseits am Durchlass D 5 (Abb. 4-17) – größere Bereiche überstaut. Die so entstehenden Überflutungsflächen sind im Kapitel 6.1.2 näher behandelt.

6.1.1.6. Weitere Auengewässer und Rückstaubereiche des OHB

Die Betrachtung weiterer Auengewässer erfolgt für diese Arbeit nur im Zusammenhang mit der Entwicklung von Überflutungsflächen, ohne weitere hydrologische Prozesse aufzuzeigen. Die Ergebnisse der Wasserstandsaufzeichnungen über den Beobachtungszeitraum werden deshalb zusammenfassend in vereinfachten, schematischen Fließrichtungskarten präsentiert, ohne auf detaillierte Prozesse einzugehen. Damit können zum einen die Veränderung der Fließrichtung je nach Situation (ÖF, natürliche Hochwasser, unterschiedliche Zuflüsse) dargestellt, zum anderen die Bereiche gezeigt werden, die bei

verschiedenen Bedingungen zeitweise Wasser führen und somit bei entsprechender Fließgeschwindigkeit auch morphologisch aktiv sind.

Für eine Wasserführung zwischen etwa $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ und $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ im OHB ergeben sich die in Abbildung 6.1-14 dargestellten Verhältnisse. Bei reduzierter oder erhöhter Ausleitungsmenge kommt es zur Verkleinerung oder Ausbreitung der Wasserwechselzonen, insbesondere in den angeschlossenen Flutrinnensystemen.

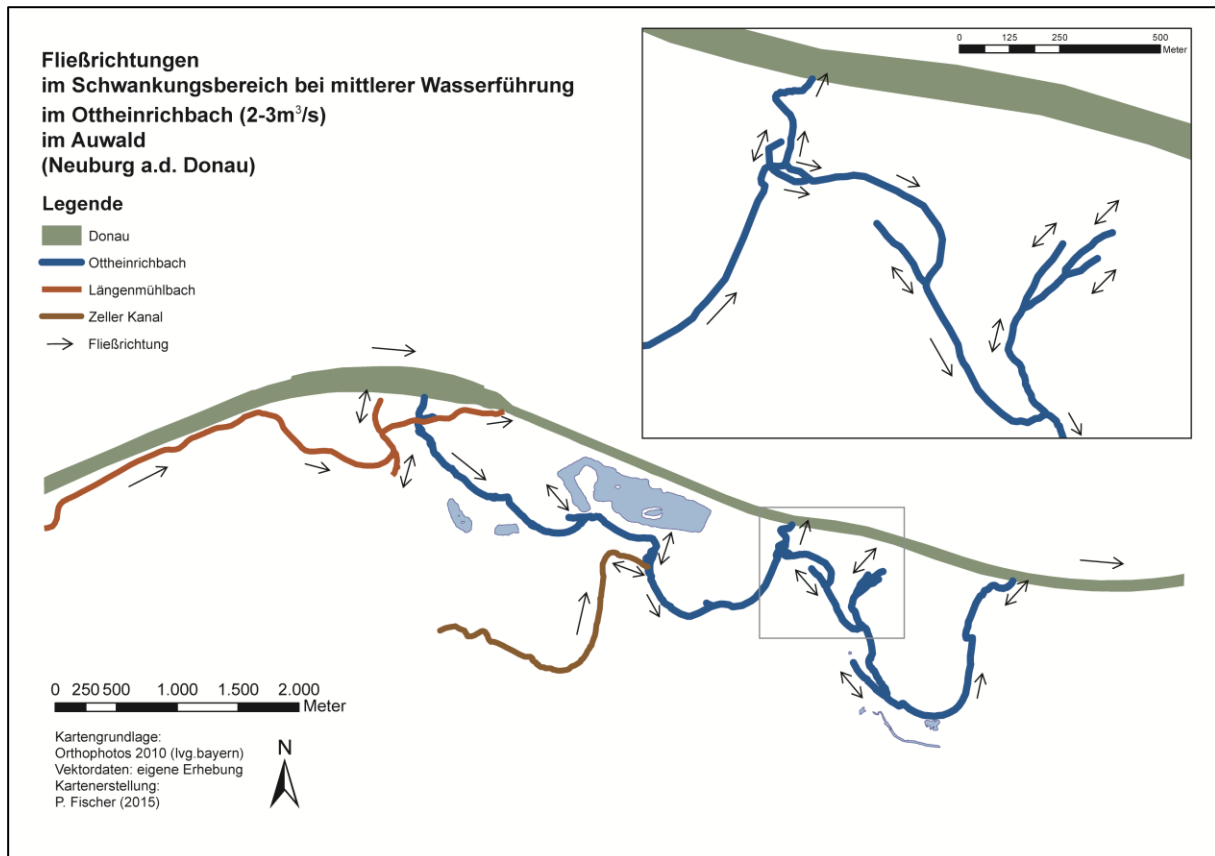


Abb. 6.1-14: Ausbreitungsrichtung von Wasser mit einer Wasserführung zwischen $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ und $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Wechselpfeile zeigen Fließrichtungswechsel.

Bei ÖF verändern sich diese Fließrichtungen. Es kann dabei zwischen der anlaufenden Hochwasserwelle in der Donau, der künstlich erzeugten Welle im Längenmühlbach (Abb. 6.1-13) und der abfallenden Hochwasserwelle (Rückzug des Wassers aus Flutrinnen und Überflutungsflächen) unterschieden werden. Die Ausbreitung der Flutungsflächen wird zudem durch Rückstauprozesse entscheidend beeinflusst, deren Wirkung kurz vor dem Abklingen (direkt nach dem Hochwasserscheitel) am größten ist. Dies soll anhand der Abbildungen 6.1-15 und 6.1-16 mit den Fließrichtungen und Überflutungsflächen bei einer ÖF-Stufe 3 (Tab. 6.1-8) verdeutlicht werden.

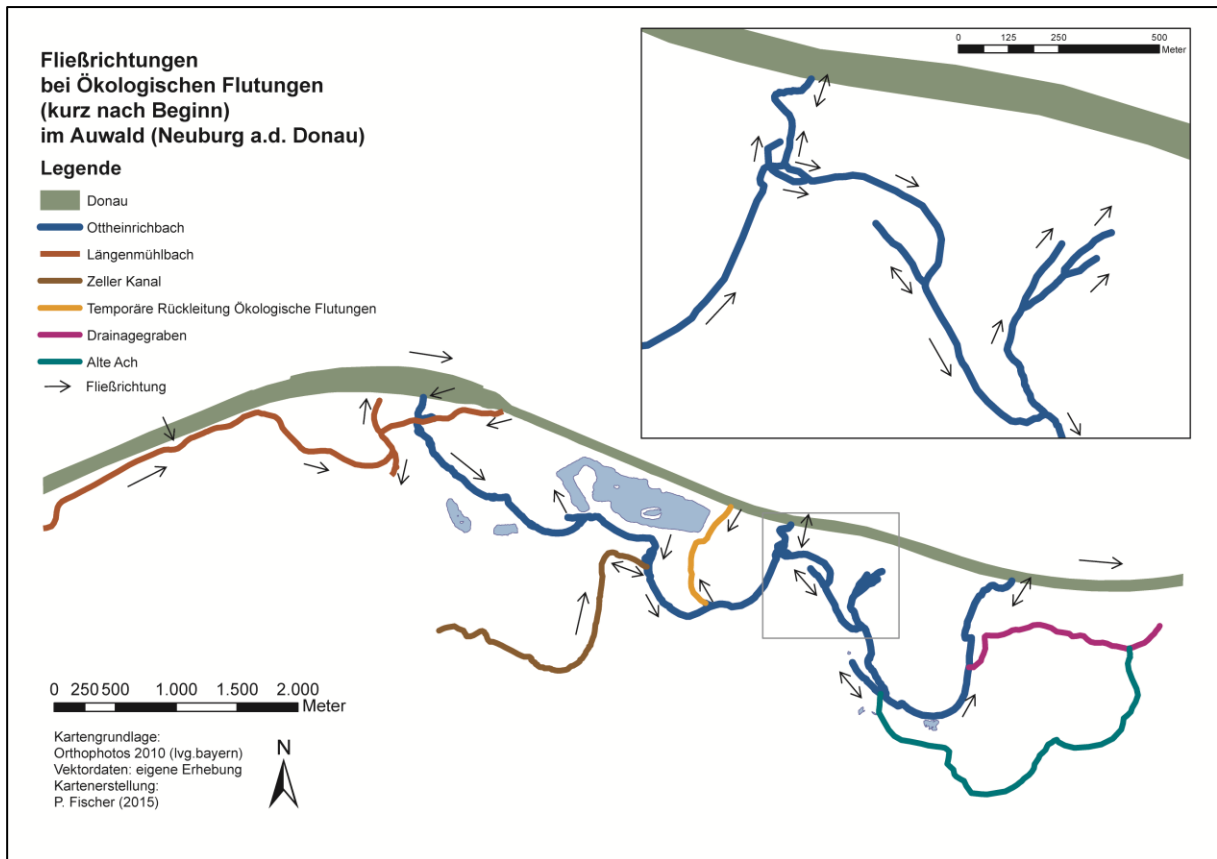


Abb. 6.1-15: Ausbreitungsrichtung von Wasser kurz nach Beginn einer ÖF.

Bei lang andauernden ÖF und gleichzeitig hohen Wasserständen in der Donau kommt es zur Aktivierung des Drainagegrabens durch ein Überlaufen der „Alten Donau“ in der Nähe des Ausleitungsbauwerks für die GWA (Abb. 6.1-15 und vgl. Abb. 4-17). Damit wird der Drainagegraben zu einem temporären FG mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten und lokalen Erosionszonen nach den Durchlässen D 9 und D 10 (Abb. 4-17). Wasseranstiege von über 1,5 m konnten am Pegel P 19 aufgezeichnet werden. Bei bisher zwei Ereignissen konnte eine zusätzliche Ausuferung im Bereich der Furt 7 (Abb. 4-17) beobachtet werden, die Wasser aus der „Alten Donau“ in ein Altwasser überleitet. Von hier kann es wie beim Juni-Hochwasser 2013 zur Flutung der sonst trockenen Alten Ach kommen.

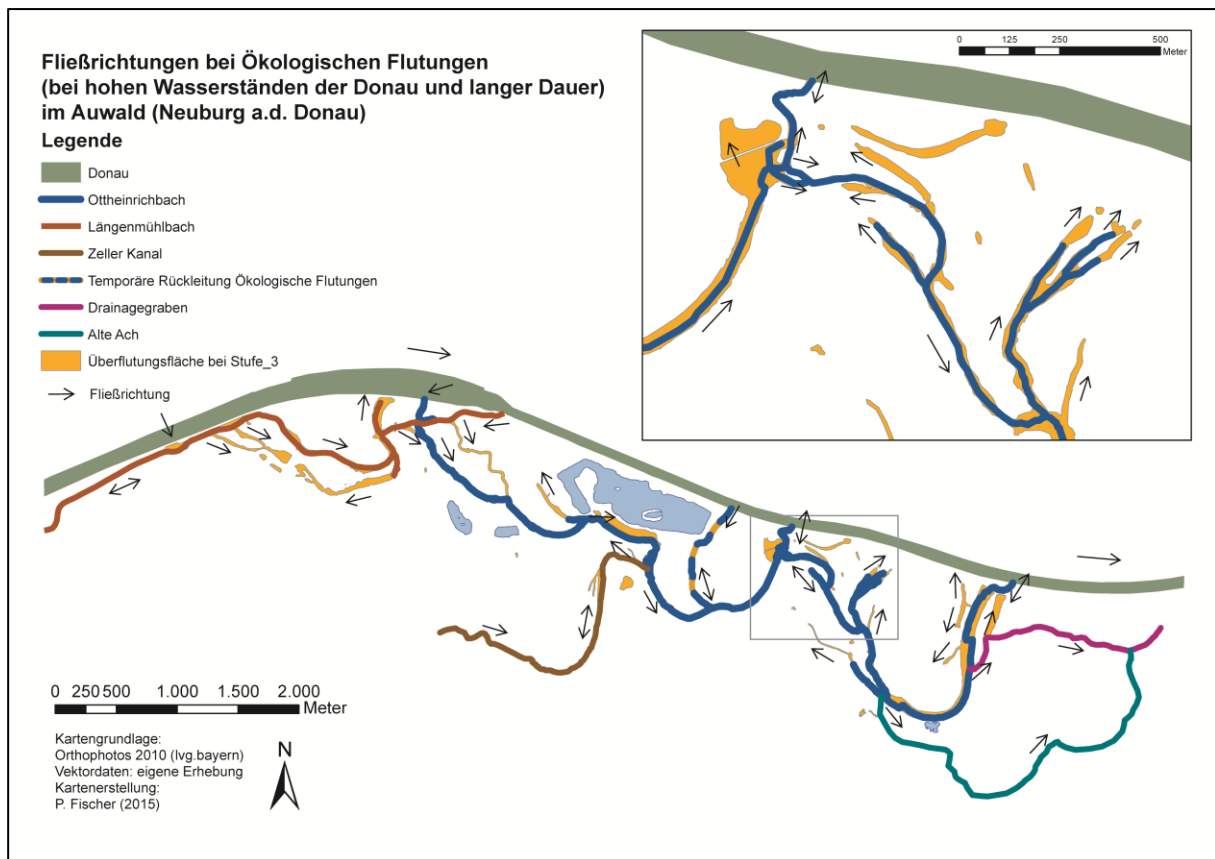


Abb. 6.1-16: Ausbreitungsrichtung von Wasser bei hohen Wasserständen der Donau und langer Dauer einer ÖF.

6.1.2 Überflutungsflächen und Wasserwechselzonen

Aus den vertikalen Wasserstandsschwankungen entstehen, insbesondere bei flach geneigten Ufern, schnell Überflutungsflächen. Bei kleineren Änderungen werden zunächst die Wasserwechselzonen geflutet, bevor es dann bei weiterhin steigenden Wasserständen zur Ausuferung und Bildung von Überflutungsflächen kommt. Über die Dauer und Ausleitungsmenge bei einer ÖF und den Anstieg in den umgebenden Auengewässern (speziell in den Fließgewässern) sowie über die jeweils erreichten Überflutungsflächen wurde eine Einteilung der ÖF nach Ausmaß und Intensität vorgenommen (Tab. 6.1-8). Aus den Beobachtungen im Gelände (Kartierung der Überflutungsflächen) und den Wasserstandsdaten ergaben sich ohne das natürliche Hochwasser fünf Stufen. Zwei kennzeichnen die Verhältnisse unter und zwei über bordvollen Abflussbedingungen im OHB. Mit den nach diesen Stufen eingeteilten ÖF-Ereignissen kann nun eine einzelne Flutung ohne Berücksichtigung weiterer beeinflussender Faktoren (wie Niederschlag, Abfluss, Grundwasserstand, Bodenfeuchte usw.) relativ einfach charakterisiert werden.

Tab. 6.1-8: Einteilung der ÖF inkl. Hochwasser (Flutung über Streichwehr) in Stufen. Zusätzlich sind die Wasser- und Überflutungsflächen (in ha) bei ÖF (kartiert) im Vergleich zu den Überflutungsflächen beim HQ₁₀ (kartiert und geschätzt) und den berechneten Überflutungsflächen (RMD CONSULT 2004A) angegeben.

Stufe	Einteilung der Flutungen nach Ausmaß und Intensität	Wasserkörper	Wasserfläche in ha
	OHB; Längenmühlbach, Zeller Kanal	Fließgewässer	24,1
	Weiherr und (große) Altwassersysteme	Stillgewässer	38,7
1	erhöhte Wasserführung in den Fließgewässern (keine Ausuferung)	Überflutungsfläche	50,2
2	erhöhte Wasserführung bis hin zum bordvollen Abfluss in den Fließgewässern, erste kleine Ausuferungen mit mäßigem Anstieg in direkt benachbarten Auengewässern und schwachem Anstieg in weiter entfernten Auengewässern	Überflutungsfläche	70,7
3	bordvoller Abfluss und kleinräumige Ausuferung mit starkem Anstieg in benachbarten Auengewässern und mäßigem Anstieg in weiter entfernten Auengewässern	Überflutungsfläche	86,9
4	durch Rückstau der Fließgewässer (insbesondere Donau) verursachte flächenhafte Überflutung und weiträumige Ausuferung sowie sehr starker Anstieg in sämtlichen Auengewässern	Überflutungsfläche	noch nicht eingetreten
5	großflächige Überflutung (HQ ₁ 7 Tage mit bis zu 1000 m ³ /s)	Überflutungsfläche	noch nicht eingetreten
	natürliches Hochwasser > HQ ₁₀ 1520 m ³ /s	Überflutungsfläche beim Juni-Hochwasser 2013	ca. 176,8
	Überflutungsfläche prognostiziert (RMD CONSULT 2004A)	Überflutungsfläche	138,4

Die bei einer ÖF überfluteten Flächen der Stufe x sind in Abbildung 6.1-17 zu sehen. Der Tabelle 6.1-8 sind die berechneten Wasserflächen bei einer Überflutung der jeweiligen Stufe zu entnehmen. Neben den Wasserflächen ohne Flutung wird auch die prognostizierte Überflutungsfläche angegeben, die nach der hydraulischen 2D-Berechnung (RMD CONSULT 2004A, vgl. Kapitel 5.1.1.4) entsteht. Diese rot eingefärbte Fläche mit 138,4 ha basiert auf dem Hochwasserereignis im März 2001. Nach dieser Modellierung sind drei Bereiche auszumachen, in denen es zu größeren Ausuferungen kommen soll (vgl. Abb. 6.1-17): im äußersten Westen im Bereich um den Längenmühlbach, im zentralen Bereich um die „Wegekreuzung“ und ein großer Bereich im Osten um die „Alte Donau“.

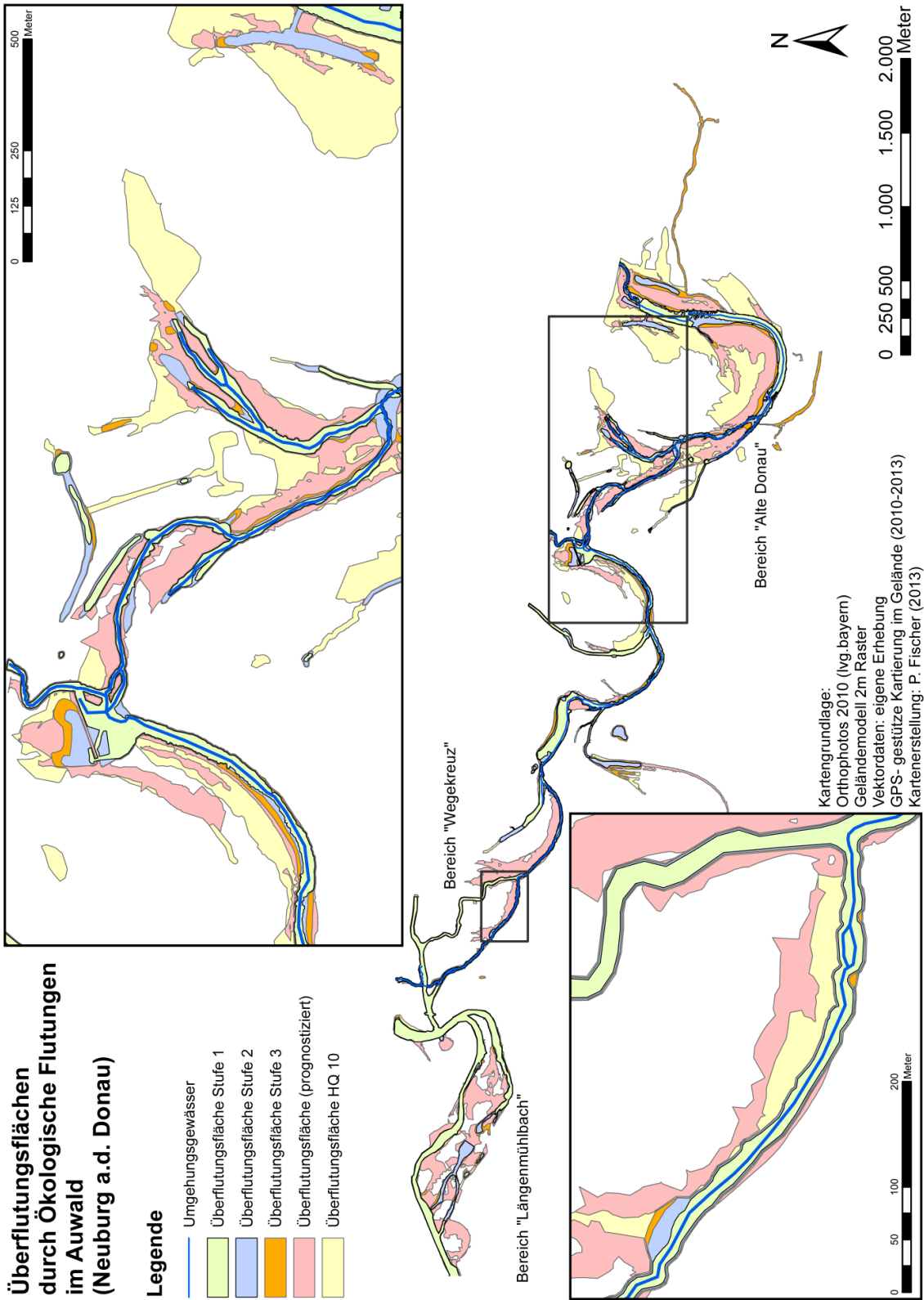


Abb. 6.1-17: Überflutungsflächen der ÖF Stufe 1 bis 3 sowie die bis zum Durchlass am Pegel 19 kartierte Ausdehnung während des Juni-Hochwassers 2013 und die prognostizierten Überflutungsflächen (Datengrundlage: Kartierung im Feld und Erfassung der Wasserstände über mobiles Messlattensystem) (FISCHER & CYFFKA in press).

Während bei dem Hochwasser im Jahr 2013 (HQ₁₀) die Flächenausdehnung des östlichen Bereichs um die „Alte Donau“, insbesondere auch zwischen Donau, Hochwasserdeich und „Alte Donau“, weit übertroffen wurde, wurden die prognostizierten Flächen in den anderen beiden Bereichen (FG-LMB und „Wegekreuzung“) nicht erreicht (vgl. Detailkarte in Abb. 6.1-17). Aufgrund der geringen Unterschiede bei der Ausdehnung sind nur in den beiden Detailkarten die tatsächlich bisher erreichten Überflutungsflächen (Überflutungsflächen der Stufe 3) in Orange auszumachen. Diese kartierten Flächen bleiben in ihrer Ausdehnung deutlich hinter den Überschwemmungsflächen des HQ₁₀ und der Ausdehnung der berechneten Flächen (Prognose) zurück. Allerdings werden auch bei einer ÖF-Stufe 3 bereits Flächen überstaut, die laut der Modellierung nicht geflutet werden sollten.

Es handelt sich v.a. um angeschlossene Flutrinnen und tief liegende Bereiche (Senken und Mulden), die durch Qualmwasser versorgt werden, sowie Flächen um den Zeller Kanal, der, wie bereits angesprochen, bei ÖF und entsprechender Wasserführung durch Rückstau an den Durchlässen über sein Ufer tritt. Besonders fallen die verschiedenen Flutrinnen- und Flutmuldensysteme auf, die auch schon bei kleineren Ereignissen (Stufe 1 und 2) für eine linienhafte Ausbreitung des Wassers im Auwald verantwortlich sind. Entlang des UG_{Gew} gibt es nur wenige Stellen, an denen es bei ÖF zu einer tatsächlichen Ausuferung kommt. Die ÖF führen zu bordvollen Abflussverhältnissen im Gerinne des OHB oder bleiben abschnittsweise noch darunter. Nur der tief liegende Bereich südlich des Albenschüttweihers, der auch schon bei mittlerer Wasserführung des OHB überflutet wird, ist hiervon ausgenommen.

Im westlichen Bereich erfolgt die Ausbreitungsrichtung der Überflutungsflächen vom Ausleitungsbauwerk ausgehend bzw. über die Flutmulden mit der Fließrichtung der Donau, durch die schon mehrfach angesprochenen Rückstauprozesse im östlichen Bereich entgegen der Fließrichtung. In der Mitte breitet sich das Wasser über die „temporäre Rückleitung für ÖF“ und die „1. Rückleitung“ je nach Wasserstand der Donau mit oder entgegen der Fließrichtung der Donau bzw. des OHB aus (vgl. Abb. 6.1-16 und 6.1-17). An natürlichen Fließgewässern erfolgt die Ausbreitung der Überflutungsflächen meist parallel zum Fließgewässer über mehrere Ausuferungsstellen, aus denen sich dann zusammenhängende Überschwemmungsflächen bilden, im PG dagegen eher punktuell über die Ausleitungsbauwerke oder die eben genannten Stellen.

Die Analyse der Wasserstände und Überflutungsflächen in Zusammenhang mit den Ausleitungsmengen zeigt, dass Dauer und Wasservolumen zwar einen Einfluss auf die Überflutungsflächen haben, dieser aber bei niedrigem Donaudurchfluss (etwa unter 825 m³/s (Pegel Ingolstadt)) als gering einzustufen ist. Erst ab 850 m³/s ist der Wasserstand in der Donau so hoch, dass die „temporäre Rückleitung für ÖF“ hydrologisch angebunden ist. Durch Rückströmung fließt das Wasser von der Donau in den Auwald oder das Abfließen von Wasser aus dem Auwald wird durch Rückstau vermindert oder unterbunden (Abb. 6.1-18). Dieser Effekt wirkt an allen anderen Anbindungen („1. Rückleitung“ und Mündung) bei den entsprechenden Wasserständen und bestimmt die Überflutungsflächen und deren

Ausbreitung. Auch bei ÖF über mehrere Tage (ÖF Nr. 7 oder Nr. 9) kommt es bei zu geringen Abflüssen in der Donau nicht zu den weiträumigen Überflutungsflächen, weil das ausgeleitete Wasser „zu schnell“ über das UG_{Gew} wieder der Donau zufließt. Beim Juni-Hochwasser konnte auch an der „1. Rückleitung“ eine Fließrichtungsumkehr beobachtet werden, die sonst nur an den beiden anderen Anbindungen vorkommt (Abb. 6.1-18).

Im umgekehrten Fall eines Trockenfallens von normalerweise feuchten Bereichen konnte für den Bereich südlich des Albenschtüweiher, bei Flächen vor der Aufteilung des OHB beim Durchlass D 6 und um den Bereich bei den Flutrinnen nach dem Durchlass D 8 über Kartierungen der Wasserflächen gezeigt werden, dass erst bei einer sehr niedrigen Ausleitungsmenge (weniger als $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$) größere Bereiche von mehreren Quadratmetern trockenfallen.

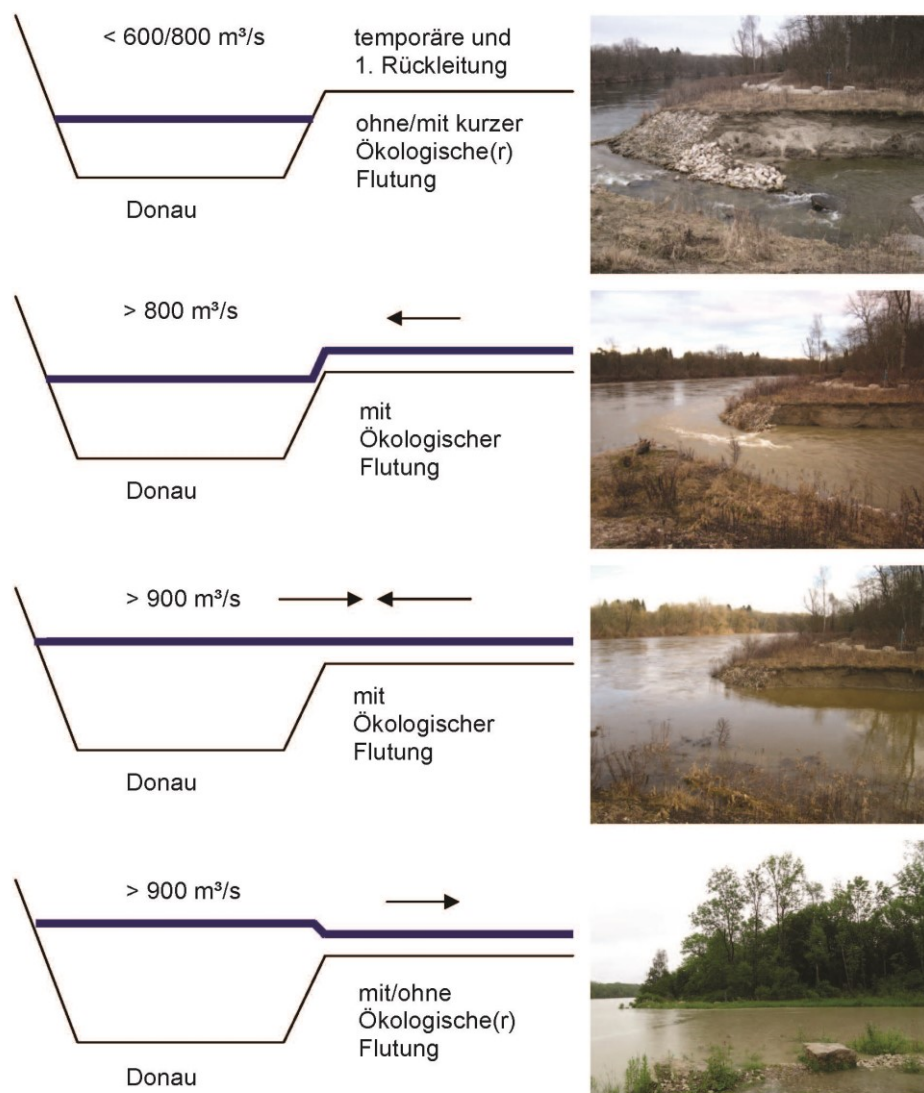


Abb. 6.1-18: Schematische Zeichnung des Wasserstandes bei entsprechender Durchflussmenge in der Donau und dessen Einfluss auf das Gesamtsystem, mit Rückströmungsverhältnissen und Fließrichtungsumkehr an den beiden Rückleitungen. Rechts: Bilder über die Wasserstandssituation der jeweiligen Zustände an der „1. Rückleitung“.

6.1.3 Abflussdynamik und weitere hydrologische Parameter

6.1.3.1. Bewertung der Abflussdynamik

Über die Abbildungen 6.1-2 und 6.1-6 und die Tabellen der Hauptwerte (Tab. 4-4 und 6.1-4) wurden wesentliche Charakteristika des neuen FG und der Donau bereits beschrieben. Da speziell die Dynamik der Abflüsse im Fokus der Betrachtung steht, wurden die Unterschiede als Quotient der mittleren Hochwasser- und der mittleren Niedrigwasserabflüsse (MHQ : MNQ) berechnet (DVWK 1984). Je kleiner dabei der Wert ist, desto geringer ist die Dynamik (Tab. 6.1-9, s. auch Tab. 4-3).

Tab. 6.1-9: Verhältniszahlen zur Charakterisierung der Abflüsse in der Donau und im OHB nach DVWK (1984) und nach Kern (2000 in HUGO et al. 2012). *Für den OHB wurde ein Abfluss von 25 m³/s für ein HQ₂ angesetzt.

Abflussdynamik	Bewertung	Donau (1924-2014)	Donau (2010-2014)	OHB (2010-2014)
MHQ : MNQ	< 20 = gering	8,5	7,8	3,3*
HQ ₂ : MNQ	0-30 = sehr gering	8,8	8,4	12,5-23,6*

Die Abflussdynamik ist, je nachdem mit welchem Berechnungsverfahren bestimmt, als sehr gering bzw. gering einzustufen. Dass die Werte für den OHB noch niedriger als die der Donau sind, lässt sich über die zusätzlich dämpfende Wirkung der Ausleitungsbauwerke und deren Steuerung erklären.

6.1.3.2. Berechnung hydraulischer Parameter

Wie bereits im Methodenkapitel 5.1.2.3 erklärt, konnten aus den Querprofilaufnahmen (siehe Kapitel 5.2.3) auch hydraulische Parameter (Fließquerschnittsfläche, hydraulischer Radius, mittlere Fließgeschwindigkeit etc.) am Querprofil abgeleitet werden. Während in Tabelle 6.1-10 die Zusammenfassung (Mittelwert, Minimum, Maximum, Median, Standardabweichung und Variationskoeffizient) der 33 Profile für die jeweils erste (1) und letzte (5) Aufnahme angegeben werden, sind die Werte der einzelnen Profile den Tabellen im Anhang 6.1-3 zu entnehmen.

Tab. 6.1-10: Hydrologische Kennwerte, berechnet aus Daten der Querprofilvermessung und bezogen auf das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

	V_{Mittel} [m/s]		Abfluss (bordvoll) [m ³ /s]		benetzter Umfang [m]		hydraulischer Radius [m]	
	1	5	1	5	1	5	1	5
Aufnahme	1	5	1	5	1	5	1	5
MW	0,92	0,95	19,37	22,63	16,96	17,73	1,13	1,19
MIN	0,50	0,47	3,26	2,44	4,22	10,15	0,45	0,40
MAX	1,27	1,39	46,18	67,35	29,75	31,37	1,80	2,06
MED	0,93	0,93	20,02	20,92	16,37	17,86	1,14	1,14
SD	0,17	0,19	11,31	14,52	5,38	4,73	0,30	0,34
VarK	0,18	0,19	0,58	0,64	0,32	0,27	0,26	0,28

Demnach hat sich die mittlere Fließgeschwindigkeit von der ersten (0,92 m/s) zur letzten Aufnahme (0,95 m/s) etwas erhöht, wobei bei zehn QP auch eine Abnahme der Geschwindigkeit verzeichnet werden konnte (Tab. 6.1-10). Die errechnete Spannweite von 0,92 m/s (bei mittleren Fließgeschwindigkeiten) zwischen Minimum und Maximum der fünften Aufnahme ist zu den gemessenen Fließgeschwindigkeiten plausibel. So beträgt der Mittelwert von 152 Messungen an den über das UG_{Gew} verteilten Messtellen 0,5 m/s, und der Mittelwert der maximal gemessenen Fließgeschwindigkeiten (V_{Max}) an den Standorten liegt bei 0,96 m/s. Der höchste gemessene Wert der Fließgeschwindigkeit von 3,8 m/s wurde während der Abflussmessung am 13.06.2013 (10. ÖF) an der „Trogbrücke“ erfasst.

Extrem groß ist der Unterschied bei den bordvollen Abflüssen. Der Minimalwert von 2,4 m³/s am QP 32 ist ebenso plausibel wie der Maximalwert am QP 33 und kann über die Querprofilgeometrie und das Eintiefungsverhältnis erklärt werden. Interessant ist auch der errechnete Mittelwert der beiden Aufnahmen, der etwa um die 20 m³/s beträgt. Auch der Blick auf die Einzelwerte (Anhang 5-3) zeigt 9 QP mit über 10 m³/s bis 20 m³/s und 17 QP mit über 20 m³/s bordvollem Abfluss. Bei einem theoretischen Abflussvolumen von 30 m³/s (OHB (5 m³/s) +ÖF (25 m³/s)) sollte es demnach bei 27 QP zur Ausuferung kommen, bei Ausleitung von 20 m³/s nur noch bei 16 Profilen. Dies konnte im Gelände nicht verifiziert werden und wird deshalb in der Diskussion später wieder aufgegriffen. Auf die hydrologischen Variablen „benetzter Umfang“ und „hydraulischer Radius“ wird bei der Auswertung der morphologischen Parameter näher eingegangen, da sie gleichzeitig als dimensionsbeschreibende Größen das Querprofil eines Flusses charakterisieren.

6.1.4 Zusammenfassung

Zur Erfassung der hydrologischen Prozesse (vertikale Wasserstandsschwankungen und horizontale Ausbreitung des Wassers) wurden neben anderen Arbeiten ein Pegelnetzwerk entwickelt und Überflutungsflächen kartiert.

Seit dem 09.06.2010 wird der Ottheinrichbach permanent mit einer an den Donaudurchfluss angepassten Wassermenge beschickt, es konnten bis Ende Juli 2015 insgesamt 13 Ökologische Flutungen (ÖF) durchgeführt werden.

Den zwei Jahren mit geringeren Durchflüssen 2011 und 2014 stehen die Jahre 2010 und 2013 gegenüber, das Jahr 2012 liegt nahe am langjährigen mittleren Durchfluss von $312 \text{ m}^3/\text{s}$. Auswertungen der Durchfluss-Daten der Donau zeigen, wie unterschiedlich einzelne Jahre sein können und welche Spannweiten sich aus den variierenden Durchflüssen ergeben. Die durchschnittliche Dauer von Hochwasserereignissen zwischen $600 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt unter 7 Tagen. In den letzten fünf Jahren traten zwar mehr als 20 Hochwasser über $600 \text{ m}^3/\text{s}$ auf, jedoch konnten nur 10 ÖF in diesem Zeitraum durchgeführt werden.

Die Wasserstandsschwankungen nehmen unter gesteuerten Bedingungen im Verlauf des Ottheinrichbachs ab. Bei natürlichen Hochwassern dagegen sind die größten Schwankungen an der Mündung zu finden. Dies hängt einerseits mit den standortspezifischen Verhältnissen (hydrologische Anbindung und Lage), andererseits mit den besonderen Rückstauprozessen im Projektgebiet zusammen. Über die gesamte Wasserstandsdatenreihe ergibt sich eine Amplitude von 0,89 m beim Pegel P 01, kurz nach der Ausleitung, bis zu 2,99 m am Pegel P 14, nahe der Mündung.

Über die Analyse der Ganglinienverläufe entlang des Umgebungsgewässers lassen sich wesentliche Erkenntnisse ableiten:

- Die hydrologische Konnektivität zwischen Donau und Aue wurde über diese Wiederanbindung und Reaktivierung alter Flutrinnen teilweise wieder hergestellt.
- Ein Anstieg des Wasserspiegels von über 0,5 m an Oberflächengewässern und eine deutliche Dynamisierung der Wasserstände an anderen Auengewässern konnte aufgezeichnet werden.
- In Kombination der Maßnahmen (Ottheinrichbach, Ökologische Flutung und Grundwasserabsenkung) führt zu noch mehr Dynamik in den Wasserständen als eine Maßnahme alleine und als kleine und mittlere Hochwasser.

Detailbetrachtungen von Datenreihen lieferten die Erkenntnis, dass der Pegelstand aufgrund der maximal zur Verfügung stehenden Ausleitungsmenge von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ Wassermenge unabhängig von der Dauer einer ÖF nicht mehr weiter zunimmt. Je nach Standort können individuelle Ausprägungen festgestellt werden. So sind bisher Wasserstandsschwankungen im Ottheinrichbach von maximal 2,56 m mit den Maßnahmen möglich (3,25 m wenn das Juni-Hochwasser 2013 mit eingerechnet wird). An Pegeln außerhalb des Umgebungsgewässers sind immer noch Maximalschwankungen von bis zu 1,92 m möglich.

Deutlich ist bei allen Pegeln der Unterschied zwischen einem natürlichen Hochwasser und einer gesteuerten Flutung abzulesen. Nach einem schnellen Anstieg folgt bei einer ÖF die charakteristische Plateauphase bei allen Pegeln am OHB, der eine gesteuerte und nach oben begrenzte Ausleitungsmenge zu Grunde liegt. Mit dem Schließen des „Ausleitungsbauwerks ÖF“ kommt es zu einem raschen Abfallen der Wasserstände. Dabei ist besonders bei ÖF ein Unterschied zwischen einzelnen Pegelstandorten nachzuweisen.

Auf den ersten Kilometern nach dem „Ausleitungsbauwerk ÖF“ ist ein hoher Wasserverlust im Bereich des Längenmühlbachs zu verzeichnen. Über die ermittelte Fließzeit vom Ausleitungsbauwerk bis zum Übertritt von Wasser über die Flutmulden zum Ottheinrichbach verkürzt sich die Wirkungszeit (hydrologisch und morphologisch) einer ÖF entsprechend.

Die Ausbreitung der Flutungsflächen wird durch Rückstauprozesse entscheidend beeinflusst, deren Wirkung kurz vor dem Abklingen (direkt nach dem Hochwasserscheitel) am größten ist. Nach einer Modellierung, die vor der Umsetzung der Baumaßnahmen erfolgte, sollen drei Bereiche großflächiger überstaut werden. Die Kartierung der tatsächlich überfluteten Bereiche bleibt dabei jedoch deutlich hinter den berechneten Überschwemmungsflächen zurück. Allerdings werden auch bei einer ÖF mittleren Ausmaßes bereits Flächen überstaut, die nach der Modellierung nicht geflutet werden sollten. Dabei handelt es sich v.a. um angeschlossene Flutrinnen und tief liegende Bereiche. Insgesamt hat sich durch die Renaturierung die Fläche, die bei Hochwasserereignissen, unabhängig welcher Größe, überflutet wird, deutlich vergrößert.

Im Projektgebiet erfolgen die Flutungen eher punktuell über die Ausleitungsbauwerke oder über Flutrinnen, wohingegen bei Hochwasser an einem natürlichen Fließgewässer die Ausbreitung an tiefer liegenden Stellen parallel zum Fluss erfolgt. Bei einer maximalen Ausleitungsmenge von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ottheinrichbach ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) + Ökologische Flutung ($25 \text{ m}^3/\text{s}$)) sollte es nach einer Berechnung bei 27 Querprofilen zur Ausuferung kommen, was der Realität nicht entspricht.

Interessant ist auch, dass Dauer und Wasservolumen zwar einen Einfluss auf die Überflutungsflächen haben, dieser aber bei niedrigem Donaudurchfluss (etwa unter $850 \text{ m}^3/\text{s}$ (Pegel Ingolstadt)) als gering einzustufen ist.

Das sehr diverse Strömungsbild (neben- und hintereinander geschaltete Bereiche unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Wasserfläche) zeigt eine hohe Variabilität entlang der Fließstrecke des Ottheinrichbaches. Die Fließzustände erstrecken sich von annähernd laminar bis turbulent bzw. strömendem und schießendem Abfluss. Ein Wechsel von unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten ist auf engem Raum in horizontaler und vertikaler Ausdehnung über die diversen Fließgeschwindigkeitsmessungen belegt. Wie gezeigt werden konnte, kommt es insbesondere an den hydrologischen Verbindungsstellen zwischen Aue und Donau zu einer Umkehr der Fließrichtung. Diese zieht eine entsprechende morphologische Aktivität nach sich.

6.2 Fluvial-Morphologische Untersuchungen

6.2.1 Morphologische Typisierung

Das Erscheinungsbild eines Fließgewässers, wie das des Ottheinrichbachs, stellt das Ergebnis eines vielfältigen und komplexen morphodynamischen Entwicklungsprozesses dar. Das Wasser als treibende Kraft (Kapitel 2, Abb. 2-5) und die hydrologischen Prozesse wurden im letzten Kapitel näher behandelt. Die morphodynamischen Prozesse und deren Ergebnis sollen im zweiten Teil des Ergebniskapitels näher betrachtet werden. Wie im Einleitungskapitel bereits geschrieben, kann zwischen Umlagerungsprozessen im Gewässerbett (Teilprozess 1) und der eigendynamischen Laufentwicklung (Teilprozess 2) unterschieden werden. Die Annäherung erfolgt in umgekehrter Reihenfolge, d. h. zuerst werden die den ganzen Gewässerlauf betreffenden Variablen betrachtet, bevor dann die Gewässerstruktur, die Umlagerungsprozesse im Gerinnebett und die Oberflächenveränderungen an den Ufern erläutert werden.

Diese Herangehensweise erscheint sinnvoll, da für das neu angelegte Umgehungsgewässer bereits bestehende alte, inzwischen trockengefallene Flussläufe verwendet wurden (Kapitel 4.2.1.1), in denen dann die entsprechenden Umlagerungsprozesse ablaufen, die eigentlich erst zur Ausbildung der Laufentwicklung führen. Für längere Abschnitte des OHB konnte je nach Start- und Endpunkt ein Gefälle zwischen 0,05 % und 0,11 % ermittelt werden. Bei großen zu überwindenden Höhen und kurzen Abschnitten in der Nähe von Bauwerken kann es auf bis zu 1,7% steigen. In die Berechnung der hydraulischen Variablen (Kapitel 5.1.2) ging ein Wert von 0,06 % ein. Über die Querprofilaten ergibt sich ein mittlerer bordvoller Abfluss Q_{BV} von 19,4 m³/s (1. Aufnahme) bzw. 22,6 m³/s (5. Aufnahme). Ohne auf die einzelnen Fließquerschnittsflächen an den QP einzugehen, wird anhand dieser beiden Parameter und der Abbildung 5-5 in Kapitel 5.2.1 ersichtlich, dass der OHB natürlicherweise ein mäandrierendes Gewässer ausbilden würde.

Entsprechend konnte auch eine Gesamtsinuosität (P) von 1,66 für den gesamten Fluss (Flussbettlänge (IF) = 8.401 m) berechnet werden (Abb. 6.2-1). Für die ersten drei Abschnitte und den Teilabschnitt 4.1 bis zur „1. Rückleitung“ (IF = 4.946 m) sinkt die Gesamtsinuosität mit 1,54 an die 1,5-Grenze (mäandrierend versus nicht mäandrierend) und fällt für den Neubauabschnitt mit einer Flusslänge von etwa 2.020 m mit 1,05 unter diese. Damit kann für den ersten Abschnitt per Definition von einem gestreckten Lauf gesprochen werden, der dann in einen gewundenen bzw. mäandrierenden Verlauf übergeht. Bei der Betrachtung der Abbildung 6.2-1 und den ermittelten Kennwerten wird die von manchen Autoren als unzureichend bezeichnete Unterscheidung in nur drei Laufformen deutlich, soll aber nicht weiter diskutiert werden (siehe dazu SCHERLE 1999). Auffallend sind auch die längeren Rückstaubereiche in mehreren Flutrinnensystemen. Werden diese zur Lauflänge gezählt, steigt diese auf 11.128 m an (Abb. 6.2-1).

Die Mäandergürtelbreite, welche nach ZELLER (1967) den Bereich zwischen zwei parallelen Linien zu einer gedachten Achse darstellt und innerhalb derer sich der Flusslauf bewegt, beträgt 1.283 m. Würde man von einer 10fachen Gewässerbite ausgehen, was wie in

Kapitel 5.2.1 bereits erläutert, etwa der Bogenlänge einer Mäanderschleife bei bordvollem Niveau entspricht, würde bei einem Mittelwert von 16,5 m die Mäandergürtelbreite bei 165 m liegen. Durch die wiederholte Betrachtung der Abbildung 6.2-1 wird auch klar, dass die Breite des Mäandergürtels ein Mehrfaches der Mäanderamplitude ist und diese als Einzelparameter, gemessen an einem einzelnen Mäanderbogen, eine ganz andere Bedeutung hat. Weitere Ausführungen und Beziehungen zur Mäandergeometrie sind bei ZELLER (1967), HARNISCHMACHER (2002) und DA SILVA (2006) zu finden. Folgen wir dem vereinfachten Berechnungsansatz (Kapitel 5.2.1), lässt sich für die 33 untersuchten QP bei einer mittleren Breite von 16,5 m eine Bogenlänge von 82,5 m errechnen. Weiterhin lässt sich im Vergleich zu idealtypischen Mäanderflüssen eher ein unregelmäßiger Verlauf der Schwingungen erkennen und auch eine rechtwinklige Ausbildung von Kurven in der Linienführung ausmachen. Bei einer sehr generalisierten Darstellung (Abb. 6.2-1) lassen sich letztendlich etwa drei bis sechs große Mäanderbögen abgrenzen (den ersten Abschnitt, vgl. Abb. 4-13, nicht miteinberechnet, da er nicht dem Mäandersystem zuzurechnen ist), die sich an den alten Terrassenkanten orientieren und damit den Verlauf alter Flussschlingen und Nebenarme der Donau im noch unbegradigten Zustand nachzeichnen.

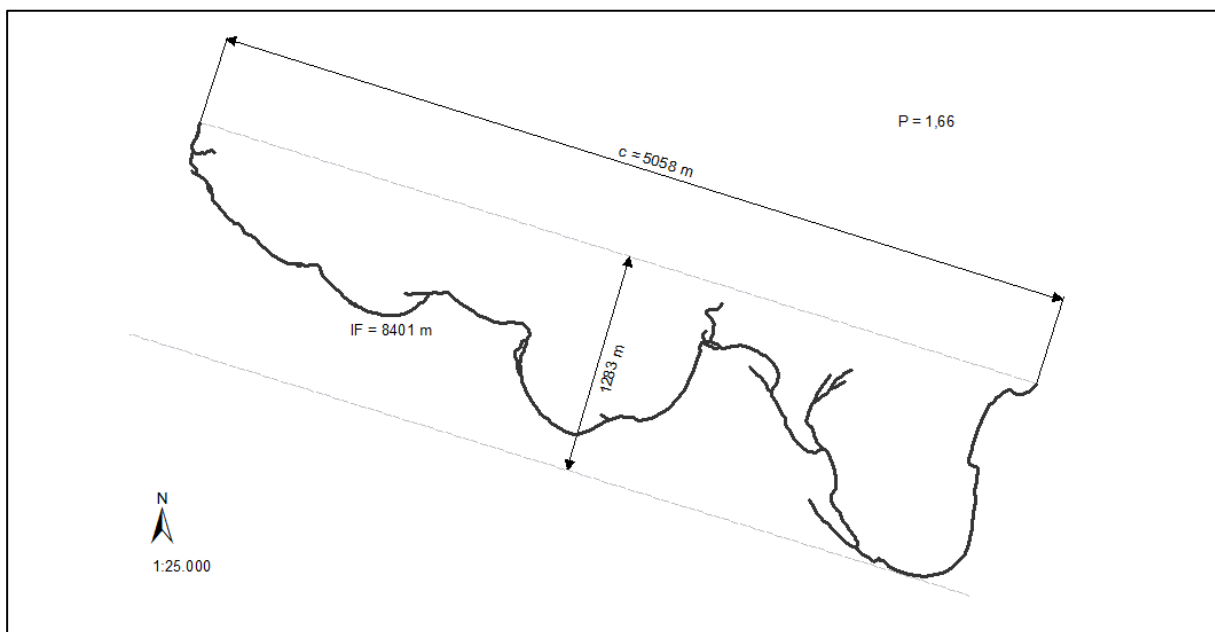


Abb. 6.2-1: Verlauf des OHB mit eingezeichneter Mäandergürtelbreite.

Desweiteren wurden die nach dem Verfahren von DA SILVA (1991) zu erwartenden Gerinneformen abgeschätzt. Hierzu wurde für jeden bekannten Querschnitt der 33 QP aus der Querprofilatenbank die entsprechenden Parameter (relative Flussbettbreite Y und relative Abflusstiefe Z) berechnet. Zuvor wurde wie im Kapitel 5.2.1 beschrieben, der Median d_{50} als charakteristischer Korndurchmesser aus Geschiebeprobe berechnet (Abb. 6.2-2).

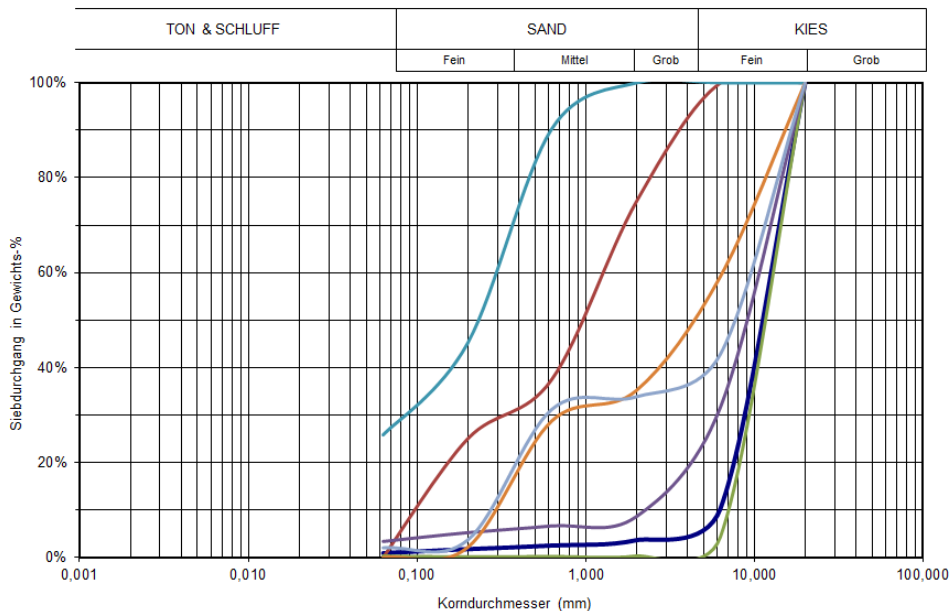


Abb. 6.2-2: Kornsummenlinie ausgewählter Messungen (türkis, orange und blau: 21.07.2011; rot violett, dunkelblau und grün: 21.12.2012).

Aufgrund der großen Spannweite, die sich zum Teil aus der Substratumlagerung während der Bauphase und des sich anschließenden Materialtransportes ergibt, wurden neben der ersten und fünften bzw. letzten QP-Aufnahme auch die zwei unterschiedlichen Korndurchmesser berücksichtigt. Diese lagen zwischen 0,235 mm und 12,6 mm für den d_{50} (Abb. 6.2-3). Es wird ersichtlich, dass sich die Punkte, in deren Berechnung die Werte der großen Korndurchmesser eingegangen sind, im Grenzbereich zwischen alternierenden Bänken und geraden Gerinnen befinden. Bei Berücksichtigung der kleinen Kornfraktion ergibt sich eine Verschiebung hin zu mäandrierenden Gerinnen. Zwischen der ersten und der fünften Aufnahme kommt es bei vielen Datenpunkten zu einer leichten Verschiebung hin zu eher mäandrierenden Formen. Die sich ausbildenden Gerinneformen sind ganz wesentlich von der Abflussmenge beeinflusst, deswegen sind auch je nach Wasserführung unterschiedliche Bedingungen denkbar. Die hier vorgenommenen Auswertungen beziehen sich auf das bordvolle Niveau.

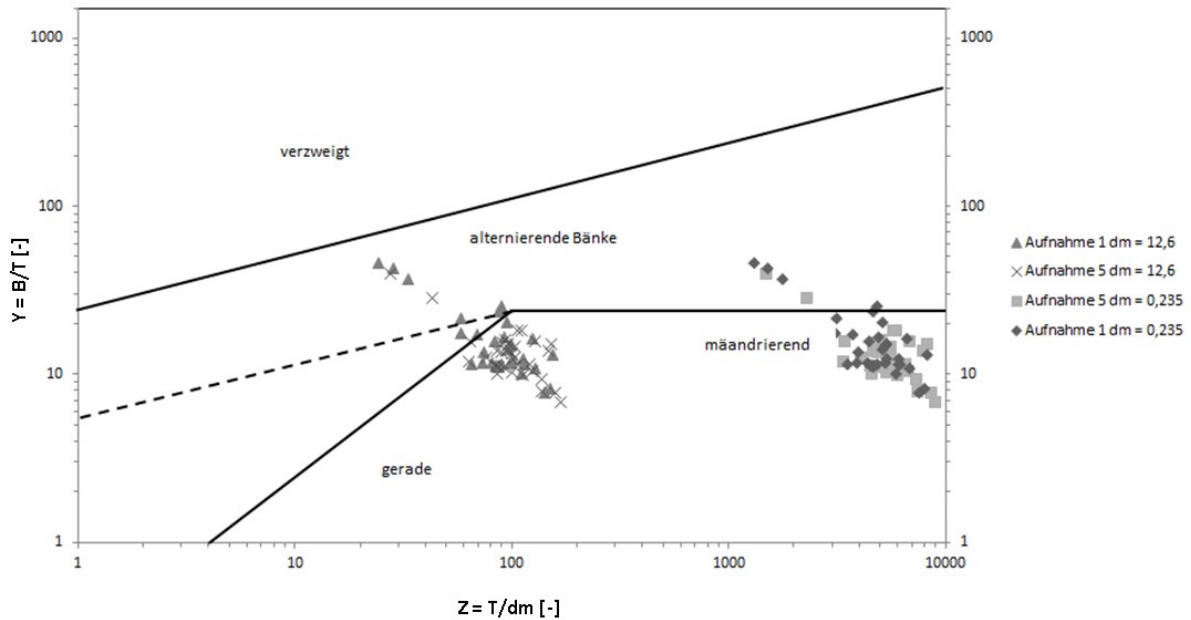


Abb. 6.2-3: Abgrenzungskriterien zur Gerinnemorphologie nach DA SILVA (1991) und der Modifikation nach ZARN (1997) mit den Daten aus der Querprofildatenbank für den Neubauabschnitt des OHB für die Aufnahme 1 (Dreiecke und Rauten) und Aufnahme 5 (Kreuze und Vierecke) mit jeweils zwei Korngrößen ($d_m = 0,235$ mm Viereck und Raute und $d_m = 12,6$ mm Dreieck und Kreuz).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der vorgegebene Gewässergrundriss von einer natürlichen Linienführung abweicht und sich die Trennung in Neubaustrecke und alte Flussschlingen wie im Kapitel 4.2.1.1 vorgenommen auch mit morphometrischen Kenngrößen nachweisen lässt.

6.2.2 Gewässerstrukturkartierung

6.2.2.1. Kartierung von Strukturelementen (Totholz)

Der Vergleich der beiden Gewässerstruktur-Habitatkartierungen (Abb. 6.2-4, Tab. 6.2-1) zeigt, dass es zu einer Differenzierung der Lebensräume durch Zunahme und Verlagerung von Strukturelementen sowie Weiterentwicklung von „Initialhabitaten“ gekommen ist. Von der Erstaufnahme zur Zweitaufnahme sind sieben neue Habitate/Physiotope hinzugekommen. Zum einen kann dies auf die Etablierung von Unterwasser- und Ufervegetation zurückgeführt werden, die sich natürlich auch erst mit dem Wasser entwickeln konnte, zum anderen aber auch auf eine deutliche Veränderung von morphologischen Strukturen (Sandbänke, Prallhänge, u. a.). Die deutlichsten Strukturveränderungen sind das Verfüllen von Pools mit Sediment, eine abschnittsweise Anhebung der Gewässersohle sowie die Weiterentwicklung und/oder Neuentwicklung von Prallhängen.

Besonders interessant für Planung und Umsetzung bei Renaturierungsvorhaben – insbesondere bei der Anlage von naturnahen Gewässern – ist der Einsatz und das Einbringen von Totholz. Eine allgemein vorherrschende Skepsis gegenüber dem Einsatz von Totholz lässt diese Maßnahme nur langsam Einzug in die Praxis finden (DICKHAUT et al. 2006). Die

vorliegende Auswertung beschränkt sich auf die Beschreibung der Drift von künstlich eingebrachten Totholzelementen wie Wurzelstöcke oder Baumstammstücken. Alle 17 im oberen Fließgewässerabschnitt („Troglücke“–„Radbrücke“) eingesetzten Totholzelemente (Wurzelstöcke, Baumstammstücke) sind bereits nach 8 Monaten flussabwärts verlagert worden, die meisten durch die erste ÖF. Nach vier Jahren sind fast alle eingebrachten Totholzstrukturen (123) im gesamten Neubauabschnitt verlagert worden, während sie nach eigener Beobachtung im weiteren Verlauf nahezu lagestabil blieben. Nur noch die tief in der Gewässersohle verankerten Baumstämme im Bereich um die „Wegekreuzung“ liegen an ihrem ursprünglichen Platz (Abb. 6.2-7). Eine Fixierung wie sie von GERHARD und REICH (2001) vorgeschlagen wird, wurde nicht vorgenommen. Über Beobachtungen und Fotodokumentation (Zeitrafferkamera) konnte eine schrittweise Verlagerung (auch außerhalb von Flutungsereignissen) bis in den Bereich südlich des Albenschüttweiher festgestellt werden. Hier hat sich eine weitgehend stabile, komplexe Ansammlung gebildet, die seit Ende 2012 besteht. Durch Sturzbäume und Biberfällungen im Bereich nach der „Radbrücke“ sowie durch Drift aus dem Längenmühlbachsystem sind auch im oberen Fließgewässerverlauf immer wieder neue, natürlich eingetragene Totholzelemente zu finden. Je nach Abflussbedingungen können sie die Morphologie verändern oder selbst das Abflussverhalten steuern. Je nach Struktur stellt die Ansammlung ein großes oder kleines Strömungshindernis dar, welches Veränderungen an Sohle und Ufer verursacht.

Tab. 6.2-1: Gewässerstrukturelemente 2010, 2011 und 2012 bezogen auf die ersten zwei Kilometer Fließgewässerstrecke („Troglücke“–„südlich Albenschüttweiher“). Die Aufnahme im März 2012 beschränkte sich auf die Kartierung von Pools.

Struktur	Anzahl Juni 2010	Anzahl März 2011	Anzahl März 2012
Kiesdepot	14	k. A.	k. A.
Kiesbank	5	26	k. A.
Pool/Kolk	29	13	13
Riffle/Furt	12	6	k. A.
Einzelstein	30	8	k. A.
Totholzstamm	12	32	k. A.
Wurzelstock	111	41	k. A.
Sonstige		79	k. A.
Gesamt	211	204	13

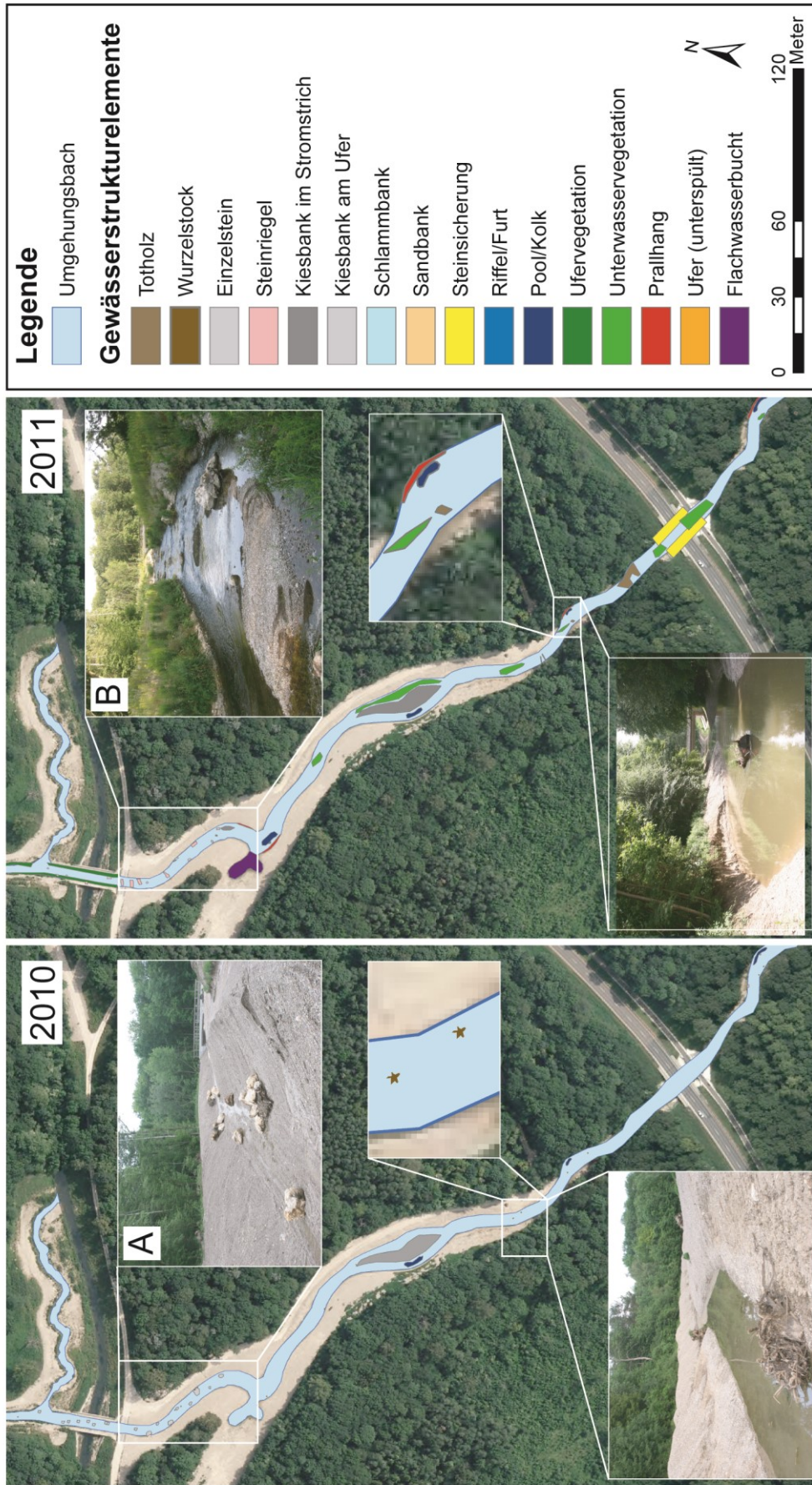


Abb. 6.2-4: Gegenüberstellung der beiden Kartierungen der Strukturelemente für den Fließgewässerabschnitt „Trogbrücke“-„Radbrücke“ 2010 und 2011 mit ausgewählten Gewässerstrukturelementen wie Wurzelstöcken und Prallhangbereichen. Bild A: Beckenpass noch ohne Wasser mit großen Einzelsteinen, Bild B: Beckenpass nach Umbau mit aufkommender Vegetation und Kiesbank am unteren Ende (verändert nach FISCHER und CYFFKA (in press)).

Besonders viele quer liegende Bäume sind direkt nach der „Radbrücke“ zu finden. Hier fielen jedes Jahr ein bis zwei Bäume entweder direkt durch Windböen oder indirekt durch Seitenerosion und Unterspülung als Folge einer ÖF um (Abb. 6.2-5, links). Inzwischen reihen sich sechs größere Sturzbäume auf nur 220 m auf. Die morphologischen Veränderungen in diesem Abschnitt wurden über die Querprofilvermessung und die Scanaufnahmen dokumentiert.

Kommt es zur gehäuften Ansammlung von Totholz wie beim Hochwasser 2013 muss es insbesondere bei Verklausungen an Brücken und Bauwerken wieder entfernt werden. An anderer Stelle kann es im OHB belassen werden (Abb. 6.2-5, rechts).



Abb. 6.2-5: Totholzeintrag im OHB. Links: Natürlicher Totholzeintrag ins Fließgewässer durch Sturzbäume (Foto: Aueninstitut 2013) und Verklausung an der „Inselbrücke“ am 1. Absperrbauwerk (Foto: Peter Fischer 2013).

6.2.2.2. Fallbeispiel: UAV-Befliegung (Teil A)

In der Abbildung 6.2-6 ist ein Ausschnitt aus den beiden Kartierungen (dGPS) der Totholzelemente im Bereich um die Wegekreuzung mit dem Luftbild aus der landesweiten Befliegung dargestellt. Über die eigens generierten hochaufgelösten und orthorektifizierten Luftbilder (Abb. 6.2-7) können sämtliche Strukturelemente direkt aus dem Luftbild kartiert werden. Bei günstigen Wasserständen (niedrig) und Abflussverhältnissen (ohne Trübung) lassen sich auch Unterwasserstrukturen deutlich erkennen. Nach der Digitalisierung im ArcGIS können auch zuverlässige Flächenberechnungen erfolgen. So beträgt die von Totholz bedeckte Fläche der kartierten Strukturen rund 28,5 m² (Abb. 6.2-7).

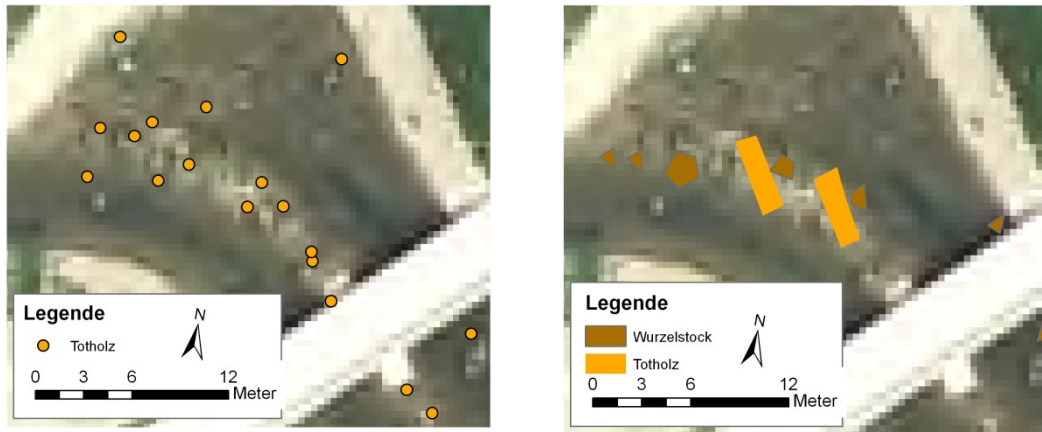


Abb. 6.2-6: Vergleich der Totholzkartierung 2010 (links) und 2011 (rechts) im Bereich der Wegekreuzung. Grundlage (Hintergrund): Luftbild 2009 LVG-Bayern. Die unterschiedliche Signatur ergibt sich aus der jeweiligen Kartierungsmethode.

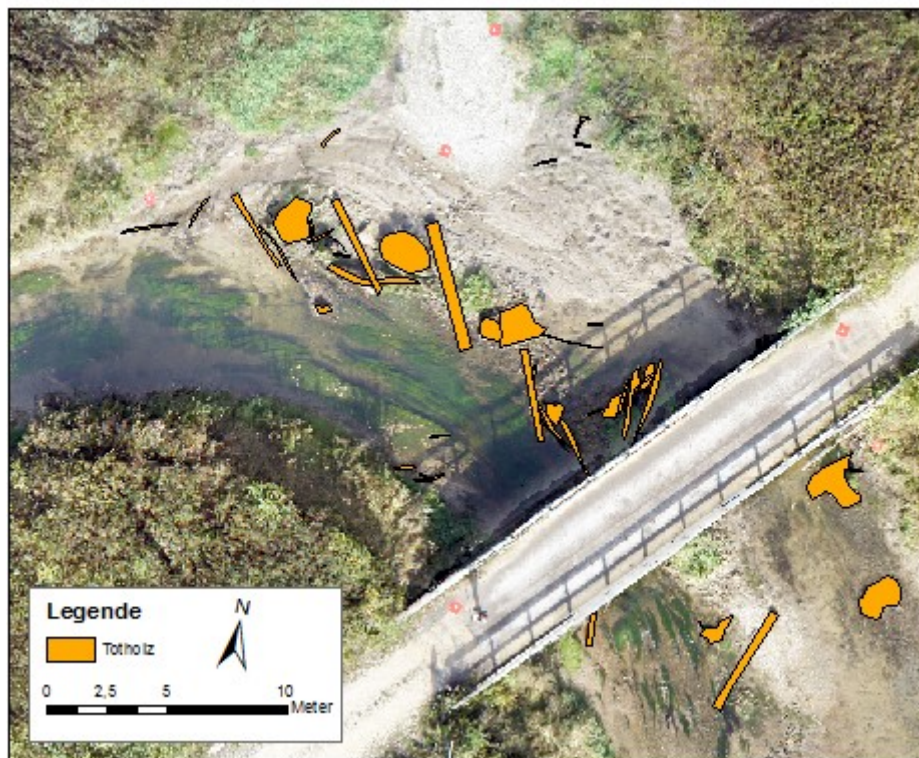


Abb. 6.2-7: Totholzkartierung 2014 im Bereich der Wegekreuzung über hochaufgelöstes Luftbild.

Tab. 6.2-2: Vergleich der Totholzkartierungen im Bereich der Wegekreuzung.

Struktur	Anzahl Juni 2010	Anzahl März 2011	Anzahl November 2014
Totholzstamm	9	2	36 (inkl. Äste)
Wurzelstock	17	8	11
Gesamt	26	10	47

Der Vergleich der einzelnen Kartierungsmethoden im Feld mit Handgeräten (Abb. 6.2-6) oder nachträglich über das Luftbild (Abb. 6.2-7) zeigt deutlich die zunehmend steigende Genauigkeit, welche sich auch in einer unterschiedlichen Anzahl der kartierten Strukturen widerspiegelt. Auf diese Problematik und die Abnahme der Strukturen, die sich bei der Kartierung 2011 ergibt, wird im Kapitel 7 näher eingegangen.

6.2.2.3. Vermessung von Riffles und Pools

Veränderungen bei den Strukturelementen über der Wasseroberfläche ziehen oft auch eine Veränderung der Unterwasserelemente nach sich. Besonders Totholz kann die Bildung von Kolken (Pools) auf verschiedenste Weise beeinflussen. Die 29 im Jahr 2010 (noch vor Inbetriebnahme des OHB) kartierten Pools weisen eine mittlere Breite von 1,4 m, eine Länge von 3,7 m und eine durchschnittliche Tiefe (residuale Pooltiefe) von etwa 0,6 m auf (ohne die vier langen und tiefen Abschnitte, wie z. B. beim „Wetterloch“, Anhang 6.2-1). Bei den 12 Riffles ergibt die besonders große Länge zwischen 8 m und 30 m der angelegten einzelnen Riffle-Strukturen den Mittelwert von 12,4 m. Auch die Breite von durchschnittlich 3 m kennzeichnet die anthropogen angelegten Strukturen, die sich im OHB nur wenige Dezimeter über die restliche (umgebende) Gerinnesohle abheben.

Im Jahr 2011 wurden hingegen nur noch 13 Pools und die Hälfte an Riffle-Strukturen kartiert (Tab. 6.2-1). Auch bei der Wassertiefenmessung 2012 konnten wieder 13 Pools erfasst werden, die, wie bei der ersten Erfassung, auch grob in ihrer Ausdehnung vermessen wurden. Mit einer mittleren Breite von 3,4 m, einer Länge von 4,2 m und einer durchschnittlichen Tiefe (Pooltiefe) von etwa 0,8 m liegen die Werte zum Teil deutlich (bis zu 2 m breiter) über der Erstaufnahme.

Auf die untersuchte Fließstrecke von etwa 2.020 m betrachtet, würde bei der Erstaufnahme durchschnittlich alle 70 m bis 80 m bzw. bei den Folgeaufnahmen etwa alle 155 m ein Pool auftreten.

Nach LEOPOLD et al. (1964) beträgt der Abstand zwischen Riffles resp. Pools das Fünf- bis Siebenfache der Gerinnebreite. Auch andere Arbeiten können diese Erkenntnis immer wieder bestätigen (GREGORY et al. 1994, THORNE 1997, VETTER 2008, BRUNKE et al. 2012).

Die Auswertung der vermessenen Riffle-Pool-Sequenzen für den OHB zeigt bei einer mittleren Breite von knapp 10 m (bezogen auf den Neubauabschnitt und den mittleren Abfluss) sowie einer theoretischen Verteilung von Riffles bzw. Pools alle 50 m bis 70 m, dass eigentlich mehr als doppelt so viele Riffle-Pool-Abfolgen auftreten sollten, als bei den beiden Aufnahmen 2011 und 2012 aufgenommen wurden.

Nach der Auswertung mit dem Zeroline-Verfahren (vgl. Abb. 5-9) ergibt sich ein anderes Bild: Alle 100 m kommen zwischen 1 und 5 Riffles bzw. Pools im Längsverlauf vor, im ersten kurzen Abschnitt (nach der „Trogbrücke“) von 75 m sogar 7 Riffles und 7 Pools (Abb. 6.2-8). Mit einer Gesamtzahl von 53 bis 64 (je nach Auslegung, da 11 Riffles ganz knapp die Linie

schneiden und so entweder als Wechsel in der Sohltopographie gezählt werden oder aber dem übergeordneten Riffle zugerechnet werden können) für beide Strukturen werden so deutlich mehr Abfolgen erfasst, als bei den Vermessungsarbeiten kartiert wurden. Mit einem Abstand von rund 38 m bzw. 31 m kommen auf den 2.020 Metern auch deutlich häufiger Riffle-Pool-Abfolgen vor als in der Literatur angegeben. Auffallend sind besonders die 14 tiefsten Pools – einer mehr, als die manuelle Kartierung und Auswertung ergeben hat –, die in Abbildung 6.2-8 nach visuellen Kriterien hervorgehoben wurden.

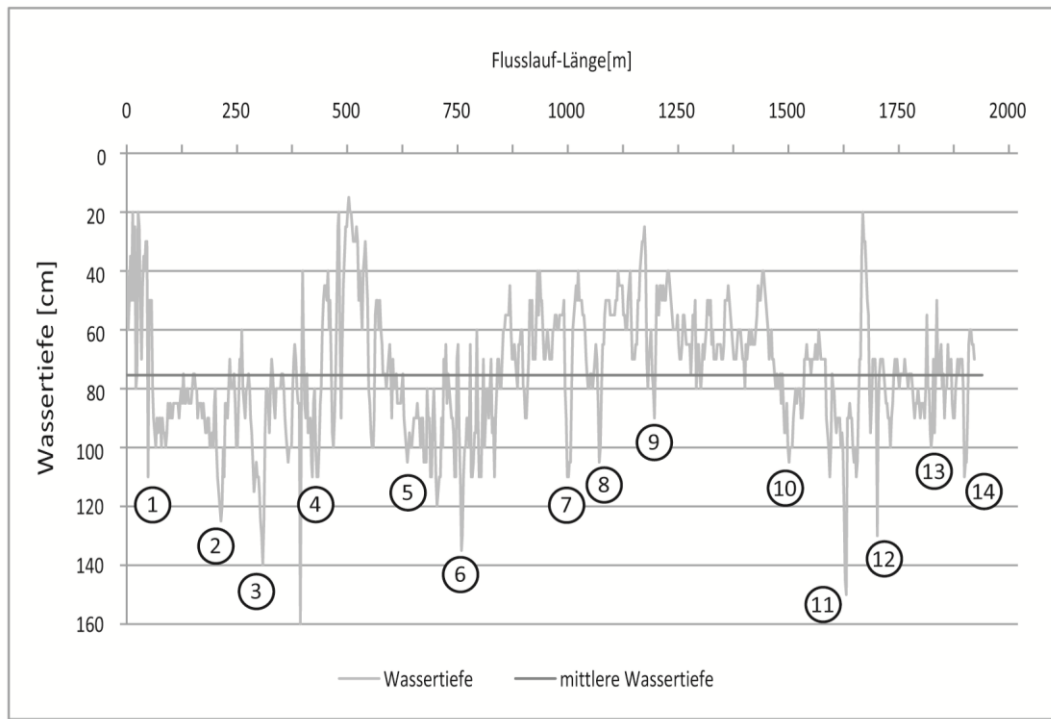


Abb. 6.2-8: Vermessung der Riffle-Pool-Abfolgen innerhalb der Neubaustrecke. Mit einem Messintervall von 2,5 m bis 3,0 m wurden zwischen 1.940 m und 2.328 m Fließgewässerstrecke vermessen. Die 14 markantesten Pools im Vergleich zur umgebenden Gewässersohle sind nummeriert.

6.2.3 Querprofilvermessung

Wie bereits im Kapitel 5.2.3 eingeführt, können bei der Analyse von Querprofilen (QP), neben einer Darstellung in Form einer Graphik und deren Interpretation, verschiedene Größen berechnet werden, wobei diese in dimensions- oder formbeschreibenden Variablen unterschieden werden können.

Zunächst erfolgt eine Auswahl von vier QP, mit denen die Gerinnegeometrie und die Variation unterschiedlicher QP-Formen herausgestellt wird. Exemplarisch sollen diese vier sehr unterschiedlichen Querprofiltypen in Abbildung 6.2-9 die Veränderung im Gewässerbett des OHB zeigen. Die Querprofile 7 und 29 stellen beide eine Prallhangsituation dar, die bereits durch die naturnahe Gestaltung angelegt wurde und sich entsprechend eigendynamisch weiterentwickelt. QP 10 befindet sich nur 250 m weiter flussabwärts von

QP 7 an einer geraden Fließstrecke (ebenfalls in ihrer Struktur so angelegt). Das QP 13 wurde mit einer Kiesinsel angelegt (Abb. 6.2-9).

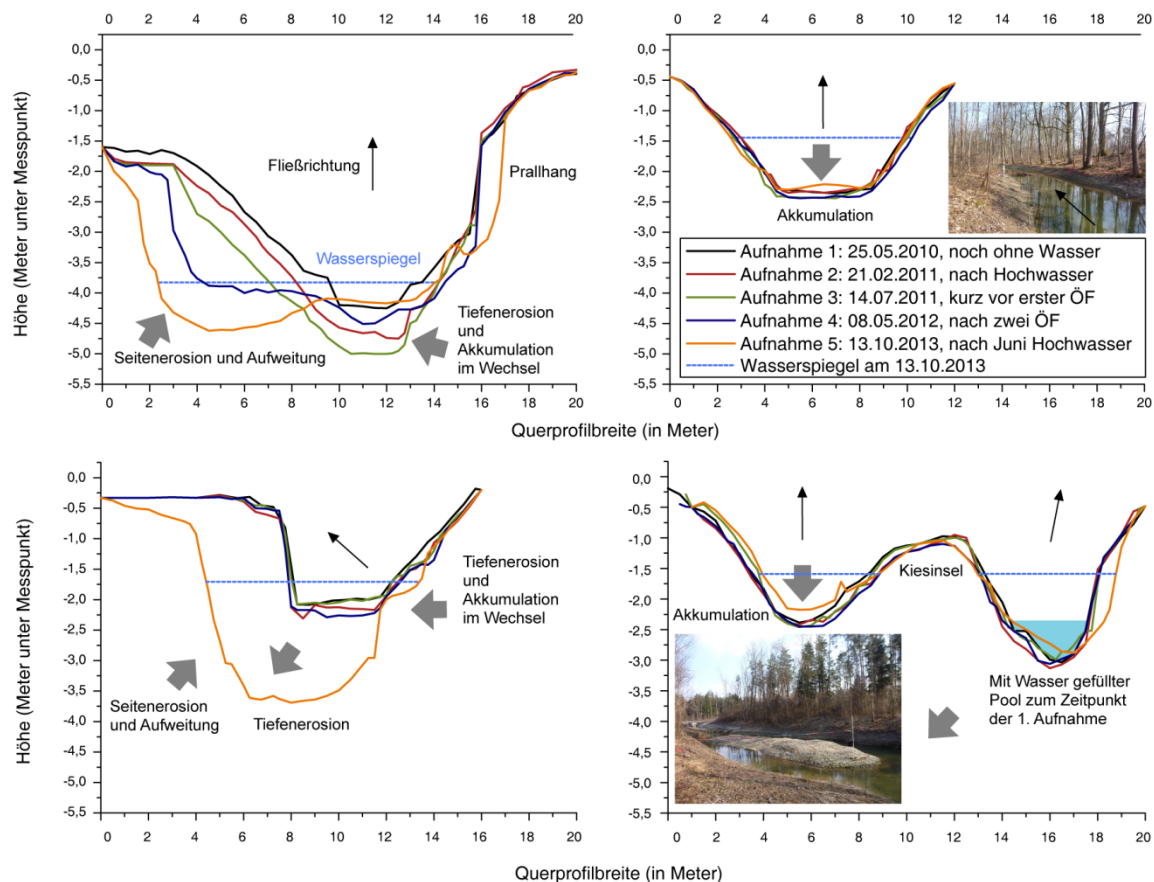


Abb. 6.2-9: Entwicklung unterschiedlicher Querprofile. Links oben: Querprofil Nr. 7 (mit Prallhangverlagerung von der orographisch rechten zur linken Seite), rechts oben: Nr. 10 (gerade Fließstrecke mit stabilen Verhältnissen). Links unten: Nr. 29 mit „plötzlicher“ Aufweitung und Tiefenerosion, rechts unten: Nr. 13 mit Kiesinsel und Pool.

Anhand der Abbildung wird die Diversität und die unterschiedliche „Entwicklungsfreudigkeit“ der einzelnen Standorte im Auwald deutlich. Das Flussbett unterliegt durch Gefälle, Strömungskräfte und Prozesse der Sedimentumlagerung einer ständigen Veränderung (QP 7 und QP 29) oder befindet sich, wie im Beispiel von QP 10, in einem „quasi-stationären“ Zustand oder verändert sich nur mäßig wie QP 13. Je nach Standort ändern sich die Breiten- und Tiefenverhältnisse bei den einzelnen Aufnahmen nur gering (QP 10 und QP 13) oder erheblich (QP 7 und QP 29). Die Hydro- und Morphodynamik während ÖF führt besonders im Bereich der Flusssohle und den Uferbereichen zu Umlagerungen und verändert die Gerinnegeometrie durch Abbrüche und Anlandung nachhaltig.

Die Formen und Merkmale der QP entlang des UG_{Gew} werden bestimmt durch:

- die Neubauforn (naturnahes Regelprofil mit ungleichen Böschungswinkeln und abwechselnder Prallhangsituation, ergänzt mit einzelnen Strukturelementen (Einzelsteine, Inseln, Totholzstrukturen, etc.),
- die bisherige Entstehungsgeschichte (Laufverlagerung der Donau, postglaziale Auenterrassen),
- die Stabilität (Sedimentzusammensetzung, Lagerung, Scherfestigkeit),
- das bisherige hydraulisch-morphologische Entwicklungsverhalten (Fließkräfte, Uferabbrüche) (vgl. FISCHER und CYFFKA (in press)).

Es lassen sich Unterschiede in der Abflusskapazität (siehe Berechnungen zur bordvollen Breite), im Strukturbestand und in der Korngrößenzusammensetzung im Sohlen- und Uferbereich entlang des Gewässerverlaufes feststellen. Betrachtet man ein theoretisches Durchschnittsquerprofil, so kann es als Weiterentwicklung des jeweiligen naturnah angelegten Regelprofils (Trapezprofil) bzw. als variierend-dynamisches Erosionsprofil charakterisiert werden.

Für eine genauere Betrachtung der QP werden die **dimensionsbeschreibenden** Größen herangezogen. Das Bezugsniveau ist, wenn nicht anders angegeben, das bordvolle Niveau (siehe Kapitel 6.2.3). Eine Auflistung dieser Größen von allen vermessenen QP ist den Tabellen im Anhang 6.2-2 bis 6.2-5 zu entnehmen, die Mittelwerte dieser Variablen geben in der Tabelle 6.2-4 einen zusammenfassenden Überblick. Allein die Betrachtung der Spannweite für die Querprofilbreite (B) von 9,5 m bis zu 29 m und einer Standardabweichung von 4,6 m zeigt die Variation der aufgenommenen QP (Tab. 5.2-4). Mit über 20 m Länge unterscheiden sich das QP kurz nach der „oberen Flutmulde“, das QP an der „Wegekreuzung“, das QP nach dem „Wetterloch“ sowie an der „1. Rückleitung“ von den restlichen (Abb. 6.2-10). Es fallen auch die Profile auf, die bei bordvollen Abflüssen eine deutliche Verbreiterung erfahren, wie QP 2, QP 3 und QP 28. Auch bei den anderen beschreibenden Größen lässt sich die unterschiedliche Dimension erkennen. So ist bspw. die maximale Tiefe T_{MAX} von fast 4 m am QP 26 bei der ersten Aufnahme gegenüber dem Mittelwert und Median von 2,16 m und dem Minimum von 0,83 m erstaunlich, lässt sich aber durch die Genese des „Wetterlochs“ gut nachvollziehen (siehe Standortbeschreibung Kapitel 4.3). Der hydraulische Radius (R_{hy}), als wichtiges Maß für die Charakterisierung des Gerinnequerschnitts, zeigt auch entsprechende Werte von 0,45 m (MIN) und 1,80 m (MAX) (vgl. Tab. 6.1-10). Bei einem höheren Wasserstand füllt das Wasser einen größeren Bereich des Gerinnequerschnittes aus, R_{hy} nimmt also bei einer ÖF entsprechend zu. Hat sich der Wert der hydraulischen Radien bei 22 QP zwischen den Aufnahmen 1 und 5 erhöht, hängt das vor allem mit der Vergrößerung des durchflossenen Gerinnequerschnitts und der Verlängerung des benetzten Umfangs zusammen, also mit einer Veränderung der Querprofilgeometrie.

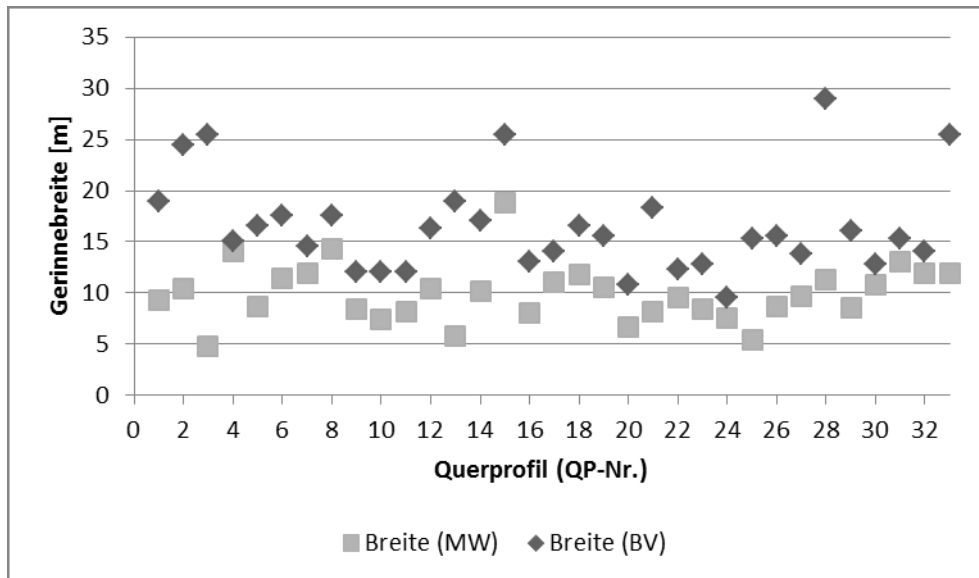


Abb. 6.2-10: Gerinnebreiten bei mittlerer Wasserführung (MW) und bordvollen Abflussbedingungen (BV) an 33 Querprofilen am OHB.

Tab. 6.2-3: Dimensionsbeschreibende Querprofilgrößen für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

	Breite		Tiefe _{MITTEL}		Tiefe _{MAX}		Fläche		Umfang	
	[m]		[m]		[m]		[m ²]		[m]	
Aufnahme	1/5	1	5	1	5	1	5	1	5	
MW	16,46	1,14	1,29	2,16	2,16	19,75	21,97	33,42	34,19	
MIN	9,50	0,31	0,35	0,83	0,70	4,54	5,21	18,22	19,65	
MAX	29,00	1,94	2,11	3,94	3,53	40,62	48,59	58,75	60,37	
MED	15,50	1,13	1,26	2,16	2,12	20,16	21,78	31,26	32,66	
SD	4,65	0,38	0,39	0,60	0,61	9,28	10,48	9,78	9,32	
VarK	0,28	0,33	0,30	0,28	0,28	0,47	0,48	0,29	0,27	

Eine relativ häufig benutzte Variable für **formbeschreibende** Größen stellt das Breiten-Tiefen-Verhältnis (= B/T), manchmal auch als „form ratio“ bezeichnet, dar. Dabei zeigt ein großes Breiten-Tiefen-Verhältnis ein eher großes (breites) und flaches QP an, wohingegen ein kleiner Wert schmale und tiefeingeschnittene QP charakterisiert. In vereinfachten Bewertungsverfahren für die Gewässerstruktur wird oft ein Breiten-Tiefen-Verhältnis von > 10:1 als natürlich, 10:1 bis > 5:1 als noch naturnah eingestuft und bei 5:1 bis > 3:1 wird in der Bewertung von geringer Naturnähe gesprochen (GRAW & BORCHARDT 2003, GRAW 2008).

Selbst der kleinste Wert für B/T_{MAX} liegt bei den untersuchten QP über einem Verhältnis von 3:1 (QP 26 mit 3,93 (Aufnahme 1) bzw. 4,39 (Aufnahme 5), siehe Anhang 6.2-4), alle anderen QP liegen noch deutlich darüber. Zwischen Aufnahme 1 und Aufnahme 5 verkleinerte sich das Verhältnis bei der einen Hälfte der QP, bei der anderen Hälfte vergrößerte es sich. Wie in Kapitel 5.3.2 schon erwähnt, kann neben der maximalen

Gerinnetiefe T_{MAX} auch die mittlere Tiefe T_{MITT} zur Ermittlung des Breiten-Tiefen-Verhältnisses herangezogen werden. Aufgrund der hohen Vielfalt an unterschiedlich geformten QP bei zumindest ähnlicher Breite und Tiefe scheint T_{MITTEL} der geeignetere Wert für die Betrachtung von Formunterschieden zu sein (HARNISCHMACHER 2002). Hier kann im Gegenzug zu oben genanntem Verhältnis B/T_{MAX} eine Verkleinerung des Mittelwerts von der ersten (Mittelwert: 16,55) zur zweiten Aufnahme (Mittelwert: 13,88) beobachtet werden. Dies lässt eine Tendenz zur Tiefenerosion vermuten, da bei gleichbleibender Breite B die mittlere Tiefe T_{MITT} größer werden muss. Diese Vermutung bestätigt sich auch bei einem Vergleich der mittleren Tiefen der 1. und 5. Aufnahme, da nur an 8 QP die mittleren Tiefen geringer werden und an 25 QP größer. Zieht man im Gegenzug die Werte der maximalen Tiefen heran, zeigt sich wieder ein anderes Bild, da nur noch 13 QP tiefer wurden und 20 QP ihre maximalen Tiefe nicht veränderten oder seichter wurden (Abb. 6.2-11 und Tab. 6.2-5). Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass durchschnittlich eine Eintiefung über das Querprofil stattfindet, wohingegen jedoch die tiefsten Stellen sukzessive aufgefüllt werden.

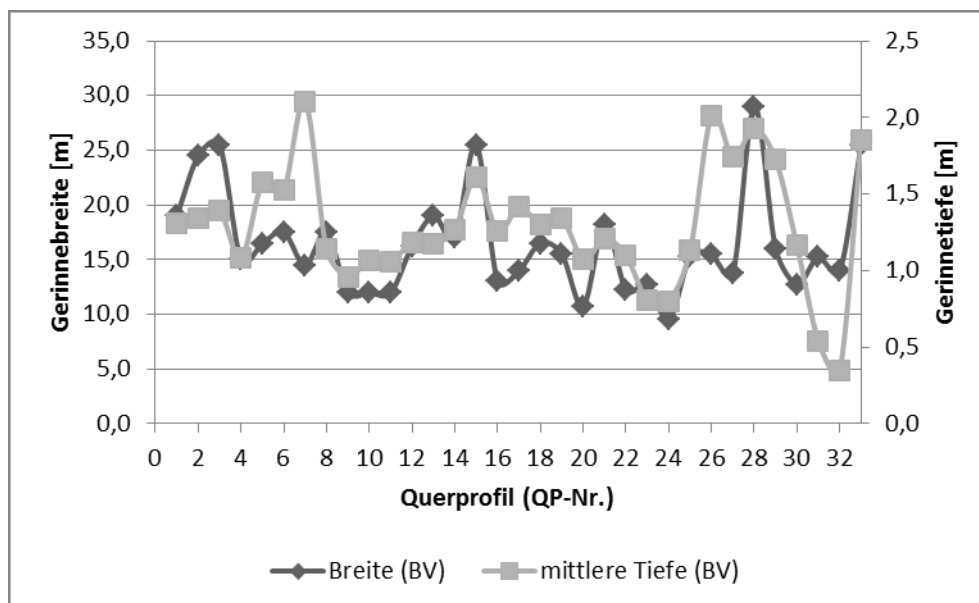


Abb. 6.2-11: Breiten-Tiefen-Verhältnis bordvoller Abflussbedingungen für die Aufnahme 5 an 33 Querprofilen am OHB.

Neben der Breiten- ist auch die Tiefenvariabilität sowohl in den einzelnen Querprofilen als auch im gesamten untersuchten Abschnitt sehr hoch, was sich auch am stark variierenden Strömungsbild ablesen lässt. Gerinnetiefen und Gerinnebreiten verlaufen entlang des Neubauabschnittes oszillierend (Abb. 6.2-11). Die Gerinnebreiten laufen manchmal gegenläufig zu den Tiefen, manchmal sind sie mitläufig, was insgesamt den „im Ungleichgewicht“ stehenden OHB zeigt. Nicht immer folgt einer Breitenveränderung auch eine Veränderung in der Tiefe, d.h. auch bei großen Tiefen können sehr breite Stellen vorkommen. Die Mehrzahl der Querprofile zeigt jedoch ein gegenläufiges Verhalten und somit, dass bei geringeren Tiefen höhere Breiten bzw. bei größeren Tiefen geringere Breiten vorherrschen.

Tab. 6.2-4: Formbeschreibende Querprofilgrößen für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

Aufnahme	Breite/Tiefe _{MITTEL}		Breite/Tiefe _{MAX}		Tiefe _{MAX} / Tiefe _{MITTEL}	
	1	5	1	5	1	5
MW	16,55	13,88	8,10	8,12	2,00	1,70
MIN	7,74	6,88	3,93	4,40	1,48	1,34
MAX	45,79	40,03	17,33	20,00	5,04	2,02
MED	13,14	12,65	7,28	7,31	1,89	1,67
SD	8,98	6,02	2,96	2,98	0,60	0,17
VarK	0,54	0,43	0,37	0,37	0,30	0,10

Auch das Breiten-Tiefen-Verhältnis $B/T_{MW-MITTEL}$ für mittlere Wasserstände der Aufnahme 5 (Abb. 6.2-12) liefert ähnliche Kennwerte wie für das bordvolle Niveau gleicher Aufnahme, wenn die mittlere Tiefe herangezogen wird (vgl. Tab. 6.2-4 und 6.2-5). Nur der Minimumwert mit 4,53 unterscheidet sich deutlicher und gibt einen Hinweis, dass die QP während mittlerer Wasserführung im Verhältnis schmaler und tiefer sind als bei bordvollen Abflussbedingungen. Die hohe Standardabweichung von 6,72 zeigt aber auch hier die hohe Streuung der Werte.

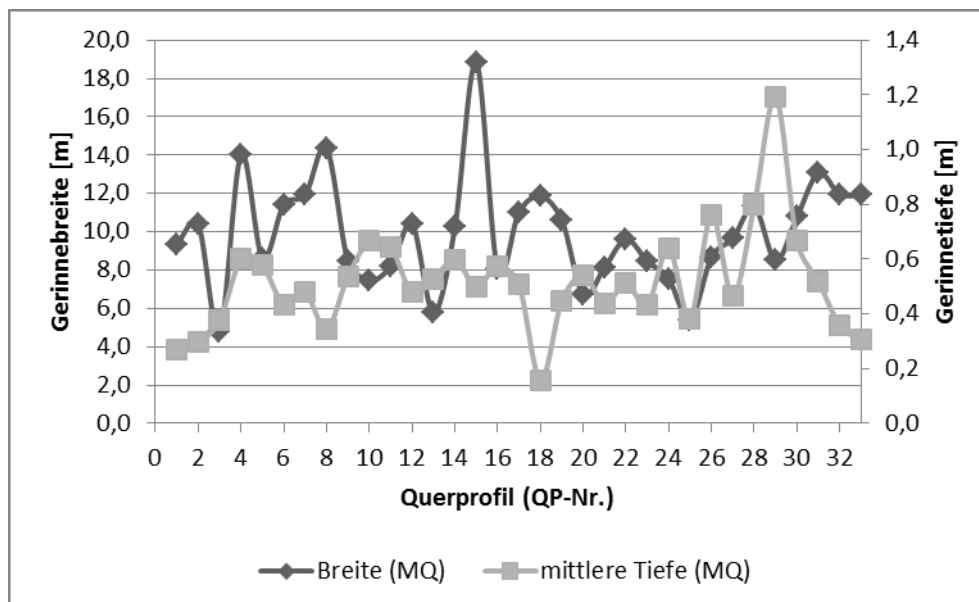


Abb. 6.2-12: Breiten-Tiefen-Verhältnis bei mittlerer Wasserführung für die Aufnahme 5 an 33 Querprofilen am OHB.

Tab. 6.2-5: Dimensions- und formbeschreibende Querprofilgrößen für das Niveau des mittleren Wasserstandes (Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

	Breite (MW) [m]	Tiefe _{MITTEL} (MW) [m]	Tiefe _{MAX} (MW) [m]	Breite (MW)/ Tiefe _{MAX} (MW)
Aufnahme	5	5	5	5
MW	9,92	0,52	0,92	12,24
MIN	4,75	0,16	0,29	4,53
MAX	18,82	1,19	1,86	40,75
MED	9,65	0,51	0,88	10,38
SD	2,78	0,18	0,29	6,72
VarK	0,28	0,35	0,32	0,55

Hinsichtlich der Beziehung zwischen B/T und dem Lehmgehalt des Sohlenmaterials sei auf SCHUMM (1960), KERN (1994) und PATT et al. (2011) verwiesen. Nach SCHUMM (1960) ist das Verhältnis von Breite und Tiefe proportional zum Prozentanteil an Lehm im Sohlmaterial. Je geringer der Anteil an Schluff und Ton in den Uferböschungen ist, desto stärker findet Seitenerosion statt und desto wahrscheinlicher ist mit einer Verbreiterung des Flussbettes zu rechnen, wenn andere Faktoren (Vegetation, Abfluss) unberücksichtigt bleiben. Bei erhöhten Lehmgehalten bleibt das Ufer relativ stabil, wie bei einem der Scanstandorte ersichtlich wird (siehe Kapitel 6.2.4.2.5).

HARNISCHMACHER (2002) warnt vor der Anwendung nur eines Parameters zur Beschreibung von Formen und bedient sich zusätzlich des von FAHNESTOCK (1963) wohl erst- und einmalig verwendeten Formfaktors F, der sich als Quotient aus maximaler und mittlerer Gerinnetiefe berechnet. Für dreieckige QP nähert sich F einem Wert von 2 und mehr an, bei parabolisch geformten QP dem Wert 1,5 und bei rechteckigen QP ist $F = 1$ (FAHNESTOCK 1963). Für Tabelle 6.2-12 wurde der Formfaktor berechnet und entsprechend die statistischen Kennzahlen mit dargestellt. Mit einem Mittelwert von 2,00 bei der ersten Aufnahme und 1,70 bei der fünften Aufnahme lässt sich auch die bereits angesprochene Veränderung belegen, das heißt die Entwicklung von QP, die an einer Stelle tief eingeschnittenen sind, hin zu gleichmäßigeren QP-Geometrien. Die deutlichste Veränderung ist bei dem Maximum des Formfaktors zu sehen, das von 5,04 auf 2,02 zwischen den Aufnahmen gesunken ist (Tab. 6.2-4). Der extrem hohe Wert von 5,04 (für die erste Aufnahme bei QP 25, Abb. 6.2-13) hängt mit der unnatürlichen Rechteck-Form zusammen, an die sich direkt die Überflutungsfläche des QP 25 anschließt. Damit fällt die mittlere Tiefe dieses QP relativ gering aus, die maximale Tiefe hingegen ist in Relation dazu sehr groß. Nach einer starken Veränderung (Aufweitung) während des Beobachtungszeitraumes hat eine Angleichung an die Form der anderen QP stattgefunden, was sich im Formfaktor sehr gut nachvollziehen lässt (fünfte Aufnahme $F = 1,91$).

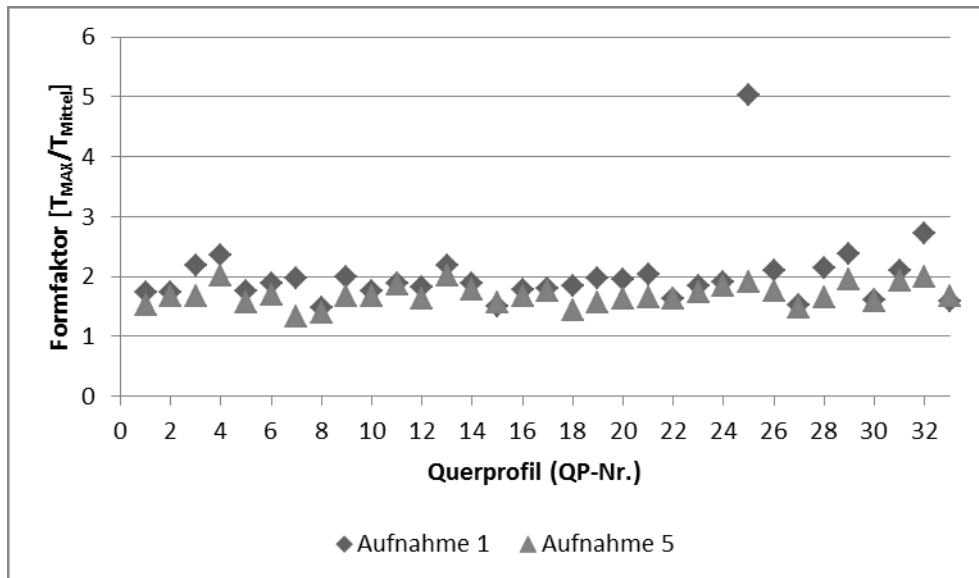


Abb. 6.2-13: Formfaktor für die Querprofilaufnahmen 1 und 5 an 33 Querprofilen am OHB.

Der Vergleich der Verhältnisse der Breiten B_{MW}/B_{BV} sowie der Tiefen T_{MAX-MW} / T_{MAX-BV} lässt Aussagen über die Variabilität der Wasserflächen und der potentiellen Ausuferungskapazität zu. Je kleiner die Werte der Verhältnisse B_{MW}/B_{BV} und T_{MAX-MW} / T_{MAX-BV} sind, desto größer sind auch die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Wasserständen. Schön zu sehen ist das am bereits bekannten QP 25 mit dem kleinsten Wert von 0,35, der sich aus dem Verhältnis der Breite bei mittlerem Wasserstand von 5,39 m zu 15,25 m bei bordvollem Niveau ergibt. Aber auch bei QP 18 wird dies mit einem Tiefenverhältnis von 0,29 m zu 1,87 m deutlich (die zuletzt angegebenen Werte sind nur auf die QP mit einem Flussbett bezogen, QP mit Verzweigungen durch Inseln sind nicht berücksichtigt) (Abb. 6.2-14).

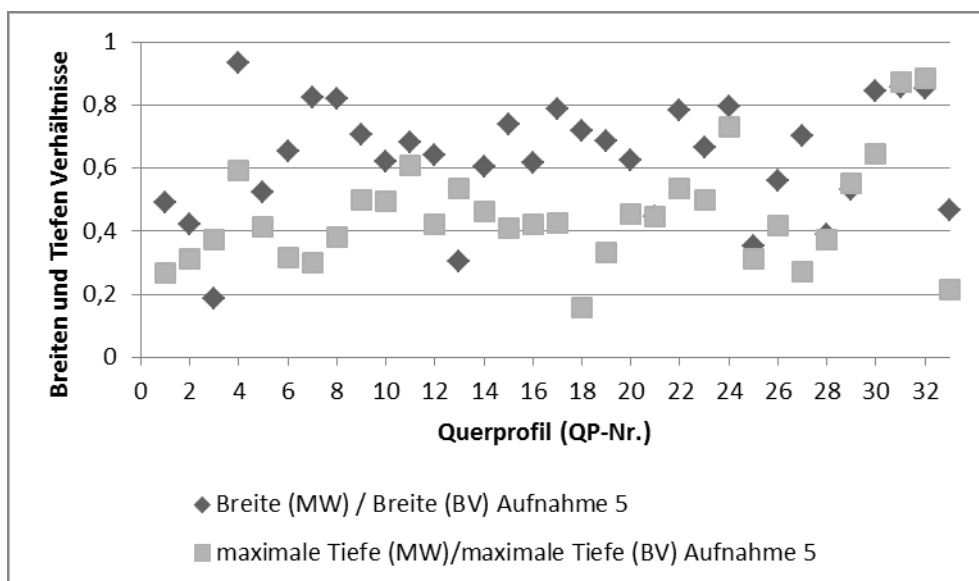


Abb. 6.2-14: Breiten- und Tiefen-Verhältnisse für die Querprofilaufnahme 5 an 33 Querprofilen am OHB.

Wenn die „Restwasserfläche“ (B_{BV} minus B_{MW}) gering ist, kann von einem steilen Ufer ausgegangen werden, die Wasserfläche verändert sich vom Mittelwasserstand bis hin zum bordvoll gefüllten Gerinne nur wenig (vgl. Abb. 5-13), wie beispielsweise an den QP 4 und QP 24. Sind große Wasserflächenzuwächse vorhanden, führen eher flache Ufer zu Wasserwechselzonen oder einer potentiellen Sekundärauenfläche entlang des OHB. Beispiele hierfür sind QP 2 und QP 28. Gleichzeitig ist bei diesen QP auch mit einer hohen Ausuferungskapazität zu rechnen, da die Gewässersohle nicht weit unterhalb der Geländeoberfläche des Gewässerumfeldes liegt.

Das von ROSGEN (1994) entwickelte Eintiefungsverhältnis bestätigt und verdeutlicht diesen Sachverhalt auf indirekte Weise. Die Situation wird beispielhaft an der „Wegekreuzung“ verdeutlicht (Abb. 6.2-15).

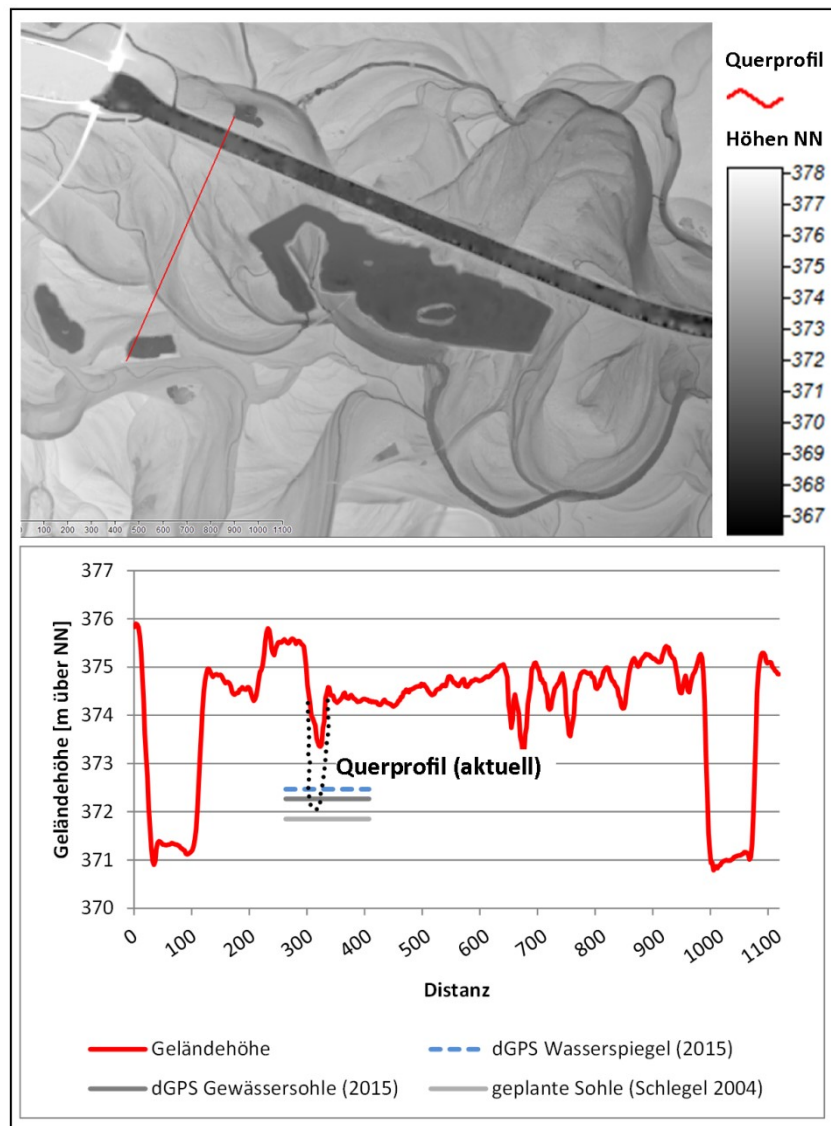


Abb. 6.2-15: Oben: Querprofil Kleiner Schlossweiher – Donau (rote Linie) über DGM. Unten: Querprofil aus Abb. oben mit geplanter und aktueller Gerinnesohle (graue Linie) und Wasserspiegel (blau gestrichelt) zur Veranschaulichung des Eintiefungsverhältnisses gegenüber dem Auenniveau.

Für den Bereich an der Wegekreuzung kann bei einer doppelten Wassertiefe bei bordvollen Abflusssituationen von 5,04 m (2 mal T_{max} für Aufnahme 5, entnommen aus der QP-Datenbank, QP 15) von einer Überflutungsbreite von mehreren hundert Metern ausgegangen werden. Bereits ab einem Eintiefungsverhältnis-Wert unter 1,4 kann von einer Eintiefung gesprochen werden ((ROSGEN 1994). Dennoch kommt es ja, wie im Kapitel 6.1.2 gezeigt wurde, nicht zur Ausuferung (vgl. Abb. 6.1-17 und 6.2-47), da höhere Abflüsse fehlen. Neben dem Ausgangszustand (vor Renaturierung) können verschiedene Geländehöhen der Gerinnesohle beobachtet werden.

Neben den dimensions- und formbeschreibenden Größen sind für die Dynamik und die Entwicklung einer Sekundäraue innerhalb der Gerinnegeometrie des OHB vor allem die **Erosions- und Akkumulationsbereiche** interessant. Die Auswertung zeigt, wie bereits die bisher vorgestellten Ergebnisse vermuten lassen, eine der Akkumulation überlegene Erosion (Abb. 6.2-16).

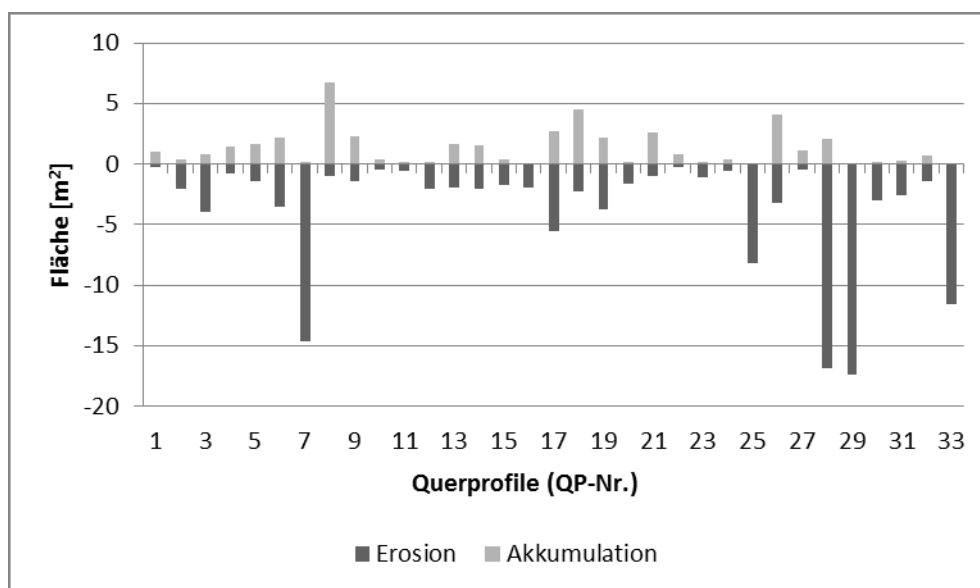


Abb. 6.2-16: Erosions- und Akkumulationsflächen an 33 Querprofilen am OHB.

Drei QP stechen aufgrund ihrer hohen Erosion mit etwa 15 m^2 Flächenveränderung heraus (Aufnahme 1 bis 5). Bevor auf diese näher eingegangen wird, soll die Aufmerksamkeit auf die QP-Folge 17 bis 20 gelenkt werden (Abb. 6.2-16). Neben den relativ hohen Erosionsraten von $5,56 \text{ m}^2$ (QP 17), $2,21 \text{ m}^2$ (QP 18), $3,76 \text{ m}^2$ (QP 19) und $1,65 \text{ m}^2$ (QP 20) fallen auch die hohen Akkumulationswerte ins Auge ($2,70 \text{ m}^2$, $4,50 \text{ m}^2$, $2,14 \text{ m}^2$, $0,15 \text{ m}^2$, in gleicher Reihenfolge). Beispielhaft für diese Reihe wird aus der Querprofildatenbank das QP 19 mit den entsprechenden Veränderungen gezeigt (Abb. 6.2-17). Diese Abbildung zeigt zudem auch alle weiteren QP-Größen, die bisher bestimmt worden sind.

Querprofil: 19

Standortbeschreibung:
 Lage: Abschnitt WK-WL, QP-Familie 17-20
 Bemerkung: Prallhang-Gleithang-Wechsel

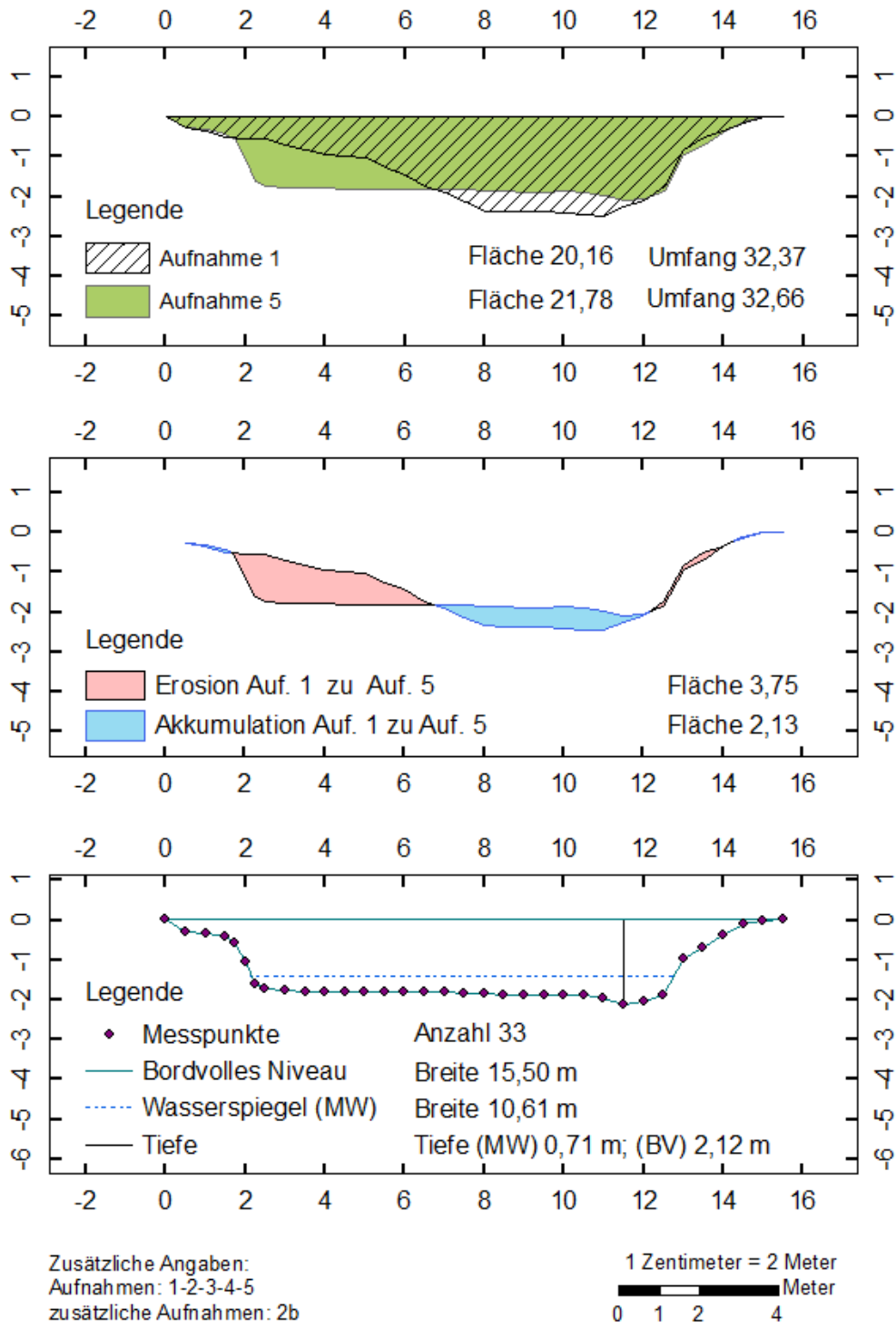


Abb. 6.2-17: Veränderungen des QP 19 von der ersten bis zur fünften Aufnahme, mit Angaben zu relevanten morphometrischen Größen (aus der Querprofildatenbank generiert).

Einen vergleichbar hohen Wert von $4,07 \text{ m}^2$ (Akkumulation) zeigt nur noch QP 26 (Abb. 6.2-16). Geringe Veränderungen unter 1 m^2 bzw. nur knapp über 1 m^2 weisen die QP 10, 11, 23 und 24 auf. QP 7 (Abb. 6.2-9, 6.2-16) hat sich mit einer Erosionsfläche von $14,77 \text{ m}^2$ sehr stark vergrößert und auch QP 28 und QP 29 haben eine extreme Vergrößerung (von $33,78 \text{ m}^2$ auf $48,59 \text{ m}^2$ (QP 28) und $9,79 \text{ m}^2$ auf $27,12 \text{ m}^2$ (QP 29)) aufgrund von Erosionsprozessen erfahren (Erosionsfläche beim QP 28 = $16,89 \text{ m}^2$ und bei QP 29 = $17,34 \text{ m}^2$). Auffallend ist auch QP 8, dort wurde eine Fläche von $6,71 \text{ m}^2$ Material akkumuliert. Hier handelt es sich um den Ablagerungsbereich der von QP 7 stammenden Sedimente, also um die Ablagerungen der im Kapitel 4.1.2 beschriebenen Postglazial-Terrasse (qhj₂).

Streuung und Regression von maximaler Tiefe, Breite und Querschnittsfläche in Abhängigkeit von der mittleren Tiefe zeigt Abbildung 6.2-18.

Die positive lineare Regression der Gerinnebreite und der mittleren Gerinnetiefe mit weiter Streuung der Werte (Bestimmtheitsmaß 0,2) bestätigt den bereits durch die Abb. 6.2-11, 6.2-12 und 6.2-14 erhaltenen Eindruck, dass nicht immer kleine mittlere Tiefen (T_{MITTEL}) große Gerinnebreiten bedingen, noch umgekehrt große Tiefen geringe Breiten nach sich ziehen. Im Allgemeinen würde man eher von einem negativen Zusammenhang bei natürlichen Gewässern ausgehen, da gewöhnlich breite QP flacher sind (geringe mittlere Tiefe) oder schmale, wenig breite QP auch tiefer sind. Hier scheint aufgrund des positiven (naturnah oder naturfern), im Gegensatz zu einem negativen (natürlich), Zusammenhangs eine weitere Bewertung der Querprofilausprägung bzgl. der „Naturnähe“ über das Breiten-Tiefen-Verhältnis möglich. Einmal mehr wird die große Breiten- und Tiefenvariabilität im OHB deutlich. Ein stärkerer Zusammenhang besteht dagegen naturgemäß mit der durchflossenen Querschnittsfläche, der allerdings aufgrund der Abhängigkeit der Variablen nicht überbewertet werden darf, da es sich bei der Fläche um das Produkt aus mittlerer Tiefe und Breite handelt.

Es wird neben dem leicht verständlichen Zusammenhang von steigenden Querschnittsflächen bei zunehmend größeren Tiefen und Breiten dennoch deutlich, dass tiefere, meist dann auch schmalere Querschnittsflächen größer sind als die Flächen, die zu flachen und breiten Querprofilen gehören. Die Riffle-Profile (flach und breit) besitzen eher kleinere, wohingegen Pool-Profile (tief und schmal) größere Fließquerschnittsflächen ausbilden. Daraus folgt, dass bei Niedrigwasser die mittleren Fließgeschwindigkeiten in den Riffle-Profilen höher sein müssen als in den Pool-Profilen (Kontinuitätsgleichung).

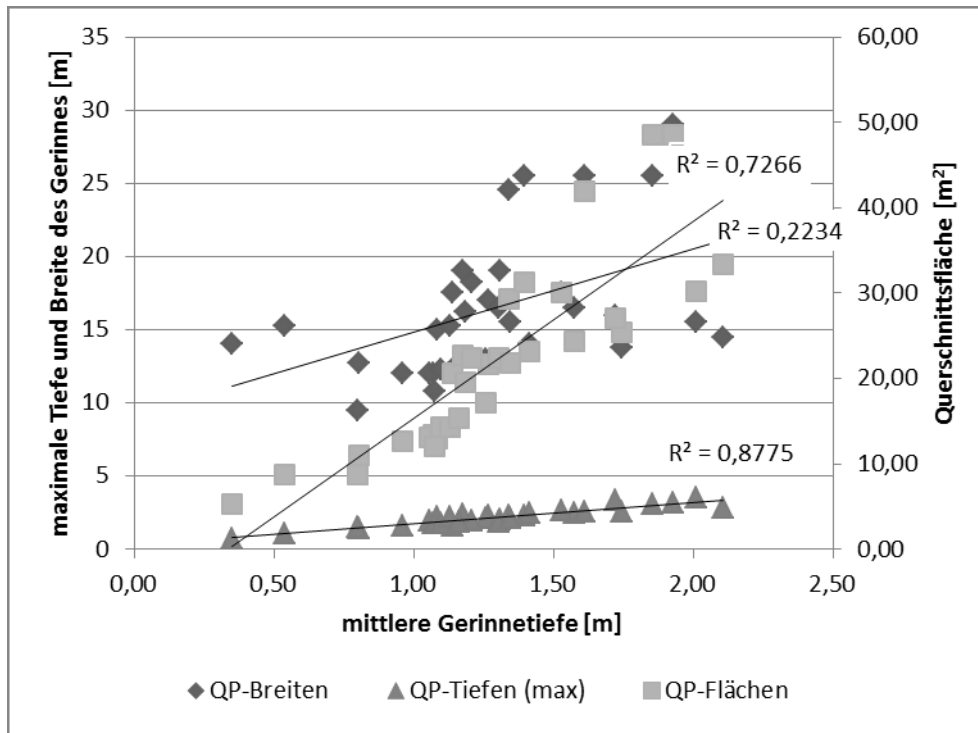


Abb. 6.2-18: Zusammenhang zwischen maximaler Gerinnetiefe (T_{MAX}), Gerinnebreite (B_{BV}) und Querschnittsfläche (A_{BV}) mit mittlerer Gerinnetiefe bei bordvollen Abflussverhältnissen.

Abschließend sollen einige Zusammenhänge zwischen hydraulischen und morphologischen Parametern aufgezeigt werden (Tab. 6.2-6).

Der Zusammenhang zwischen Breite, Umfang und Fläche bestätigt den Einfluss der Basisvariablen „Breite“ auf die Fließquerschnittsfläche. Die schon zuvor angesprochene Vermutung, dass große Gerinnebreiten häufig in Verbindung mit geringen Tiefen, kleinen hydraulischen Radien und hohen Breiten-Tiefen-Quotienten auftreten, kann hier ebenfalls nicht bestätigt werden.

Dagegen korrelieren die beiden Maße der Wassertiefen (mittlere und maximale Wassertiefe) abhängigkeitsbedingt stark untereinander. Aber auch mit dem hydraulischen Radius und der Fließquerschnittsfläche sowie den hydrologischen Parametern Abfluss und mittlerer Fließgeschwindigkeit zeigt sich eine starke Korrelation.

Auf die hohe positive Korrelation der Querschnittsfläche A mit der Breite und den Tiefenmaßen wurde bereits hingewiesen. Verständlicherweise hängen auch der hydraulische Radius und der Umfang sowie Abfluss und mittlere Fließgeschwindigkeit von der Querschnittsfläche ab.

Entsprechend korrelieren auch die mittleren Fließgeschwindigkeiten mit den Tiefenmaßen und so mit den Fließquerschnittsflächen. Wobei große Flächen mit großen mittleren Tiefen, großen hydraulischen Radien und geringen Fließgeschwindigkeiten zusammenhängen. Diese Profile weisen dann auch kleine Breiten-Tiefen-Verhältnisse auf.

Daraus lässt sich für die Morphometrie und Hydraulik ableiten, dass die Fließgeschwindigkeit in großen, also tiefen, aber schmalen Gerinnequerschnitten eher gering ist und umgekehrt.

Tab. 6.2-6: Korrelation morphometrischer und hydraulischer Parameter der Querprofile an den OHB-Neubaustrecken (Werte > 0,8 hervorgehoben).

	B	T _{MITTEL}	T _{MAX}	A	U	R _{hy}	B/T _{MITTEL}	B/T _{MAX}	T _{MAX} /T _{MITTEL}	V _{MITTEL}	Q
B	1,00										
T _{MITTEL}	0,47	1,00									
T_{MAX}	0,47	0,94	1,00								
A	0,82	0,85	0,80	1,00							
U	0,99	0,53	0,52	0,85	1,00						
R _{hy}	0,44	0,94	0,86	0,86	0,48	1,00					
B/T_{MITTEL}	0,19	-0,62	-0,58	-0,26	0,13	-0,60	1,00				
B/T_{MAX}	0,29	-0,55	-0,59	-0,16	0,23	-0,53	0,97	1,00			
T_{MAX}/T_{MITTEL}	-0,14	-0,46	-0,14	-0,37	-0,18	-0,48	0,42	0,19	1,00		
V_{MITTEL}	0,43	0,95	0,87	0,85	0,48	1,00	-0,64	-0,57	-0,50	1,00	
Q	0,74	0,86	0,80	0,98	0,76	0,90	-0,28	-0,20	-0,37	0,88	1,00

6.2.4 Terrestrisches Laserscanning

6.2.4.1. Komplettaufnahme des Umgehungsgerinnes

Das DGM der Erstaufnahme bildet das neue Gewässerbett und dessen Verlauf (von der „Trogbrücke“ bis zur Biegung nach dem „Wetterloch“) im Ur-Ausbauzustand ab, also noch ohne Wasser, direkt nach Fertigstellung der Bauarbeiten. Je nach gewähltem Betrachtungsmaßstab sind verschiedene Gewässerstrukturen wie Totholzwurzeln und Kiesdepots als kleine Erhebungen über der Gewässersohle zu erkennen.

Über das SAGA Modul *Terrain Analysis - Slope* wurden aus dem DGM des Gerinneabschnitts von der zur „Radwegbrücke“ bis zur „Wegekreuzung“ (RB – WK) die Hangneigungen des Ufers abgeleitet und sind in Abbildung 6.2-19 entsprechend eingefärbt zu sehen. Hangneigungen bis ca. 17 Grad entsprechen etwa dem naturnah angelegten Böschungswinkel von 1:3. Werte über 17 Grad Hangneigung können für Uferböschungen schon als steil bezeichnet werden und zeigen gleichzeitig das Fehlen von ausgeprägten Wasserwechselzonen bzw. das Nichtvorhandensein von Stellen, an denen es leicht zur Ausuferung kommen könnte. Die flachen Bereiche (gelb-orange) konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Gewässersohle und setzen sich klar von den Uferbereichen ab. Nur in Abschnitt B-C können zwei Bereiche (Abb. 6.2-19, I, II) als Wasserwechselzonen ausgewiesen werden, bei denen es bei steigenden Wasserständen zu einer flächigen Benetzung des Ufers kommen kann. Ein weiterer flacher Uferbereich (III) im Abschnitt D-E, kurz vor der Insel, wird nur bei ÖF aufgrund der erhöhten Lage überflutet (Überflutungsfläche der Sekundäraue). Der restliche Abschnitt wird von relativ steilen Ufern flankiert.

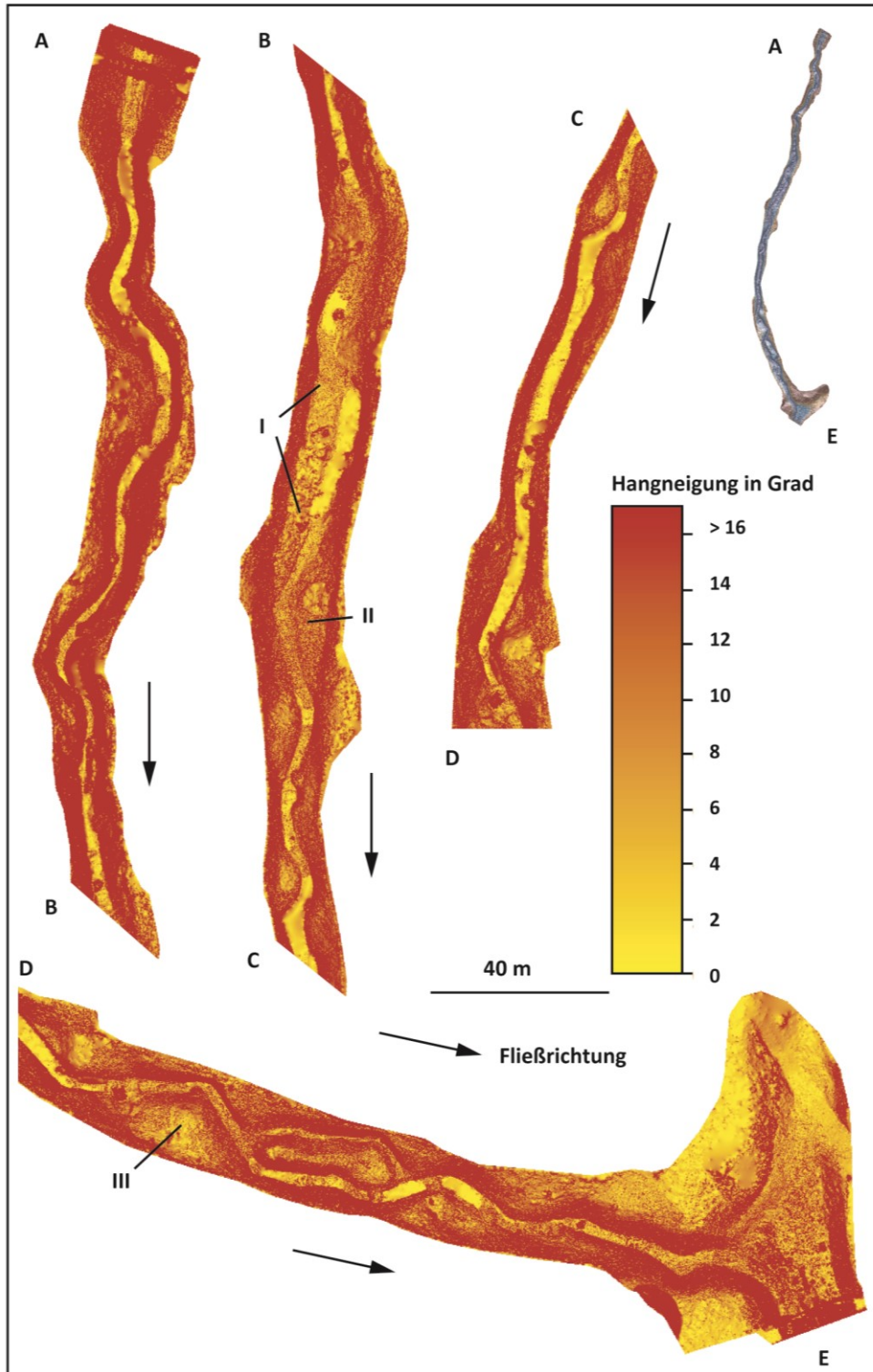


Abb. 6.2-19: Hangneigung (zwischen 0 und 17°, > 17° = rot) der Ufer vom Abschnitt I („Radbrücke“ – „Wegekreuzung“), abgeleitet aus Laserscandaten (Auflösung 0,05 m).

Dieser Sachverhalt wird in der Abbildung 6.2-20 nochmal verdeutlicht, da hier die Gerinnetiefe zum angrenzenden Auenniveau dargestellt ist.

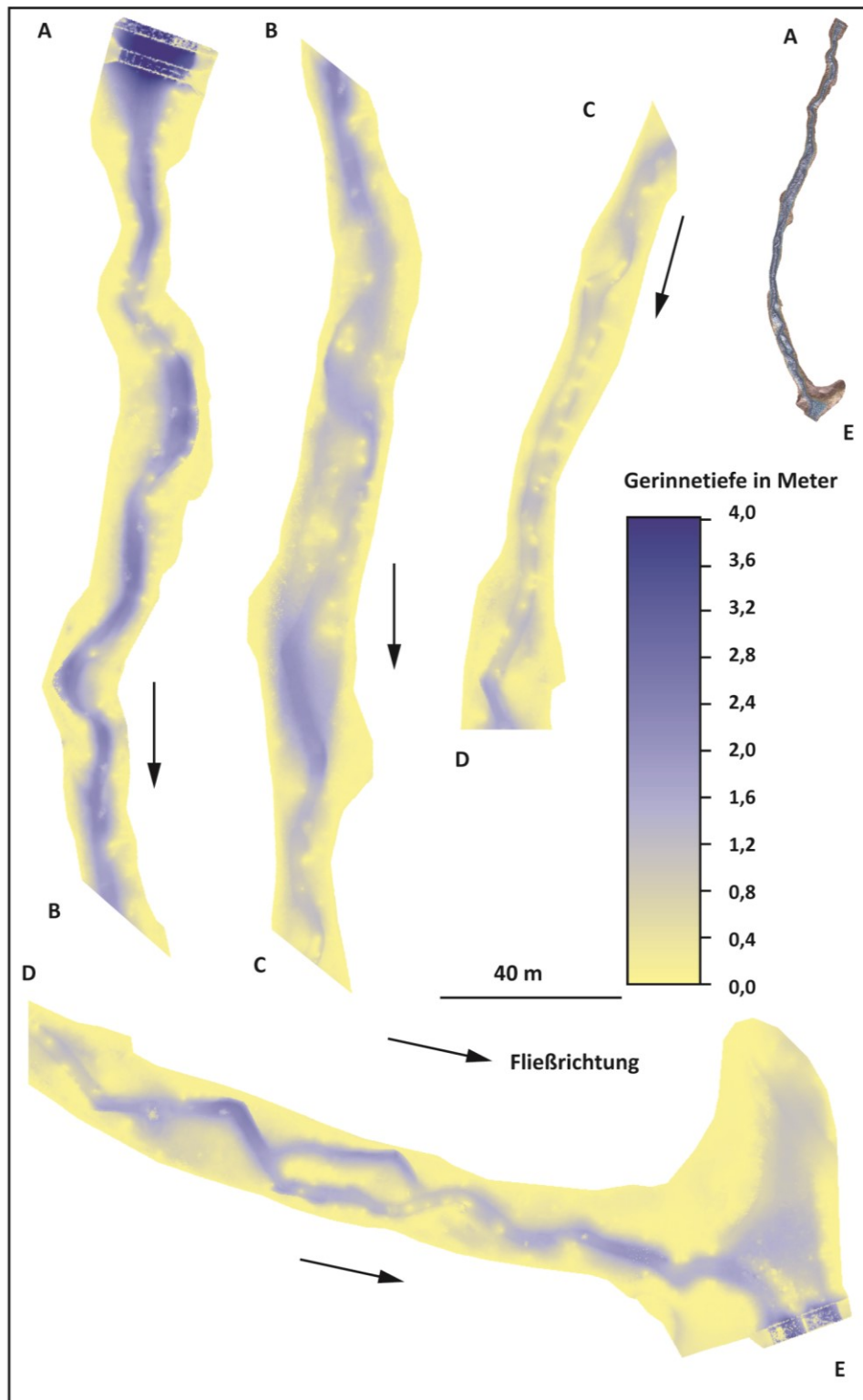


Abb. 6.2-20: Gerinnetiefe zum umliegenden Auenniveau (gelb) vom Abschnitt I („Radbrücke“ – „Wegekreuzung“), abgeleitet aus Laserscandaten (Auflösung 0,05 m).

Während die größten Tiefen unter der Brücke der Staatsstraße zu finden sind, lassen sich auch in manchen Flussaußenkurven die angelegten Prallhänge mit relativ tief liegender Gewässersohle bzw. den noch tieferen Pools lokalisieren.

Verschiedene Analysen (Breiten-Tiefenvarianzanalysen, Analysen zu dimensions- und formbeschreibenden Größen, siehe Kapitel 5.2.3.2), wie sie bei der Auswertung der Querprofile vorgenommen wurden, lassen sich auch aus dem DGM des kompletten Gerinnes ableiten. Als Beispiel wurden bei FISCHER und CYFFKA (in press) vom Gerinneabschnitt von der „Trogbrücke“ zur „Radbrücke“ automatisch Querprofile im Abstand von 30 Metern entlang der Tiefenlinie generiert.

Für künftige hydrologisch-hydraulische Berechnungen zu Überflutungsszenarien kann das hochaufgelöste 3D-Gerinnemodell einen wertvollen Beitrag leisten, da jetzt über genauere Eingangsdaten (Auflösung 0,05 m gegenüber 2 m) und die aktuelle Morphologie des Gerinnes zum Zeitpunkt nach Fertigstellung der Bauarbeiten mit den tatsächlichen Höhen der Gerinnesohle entsprechend realitätsnah abgebildet werden kann.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit findet eine Beschränkung auf sechs ausgewählte Standorte bzw. Bereiche statt, an denen in unregelmäßigen Abständen Wiederholungsaufnahmen getätigt wurden.

6.2.4.2. Scanstandorte

6.2.4.2.1. Allgemeines und wesentliche Einflussfaktoren

Die Scanstandorte (Abb. 6.2-21, Tab. 6.2-7) werden nacheinander in Fließrichtung betrachtet. An die Ergebnisdarstellung schließt sich unmittelbar die Interpretation an, um die Umlagerungsprozesse und die daraus resultierenden Formen besser verstehen zu können. Zudem erfolgt unterhalb der Abbildung eine Beschreibung der wesentlichsten Oberflächenveränderungen, welche mit Ziffern versehen und in der Abbildung wiederzufinden sind. So können diese Bereiche schnell und einfach zugeordnet werden.

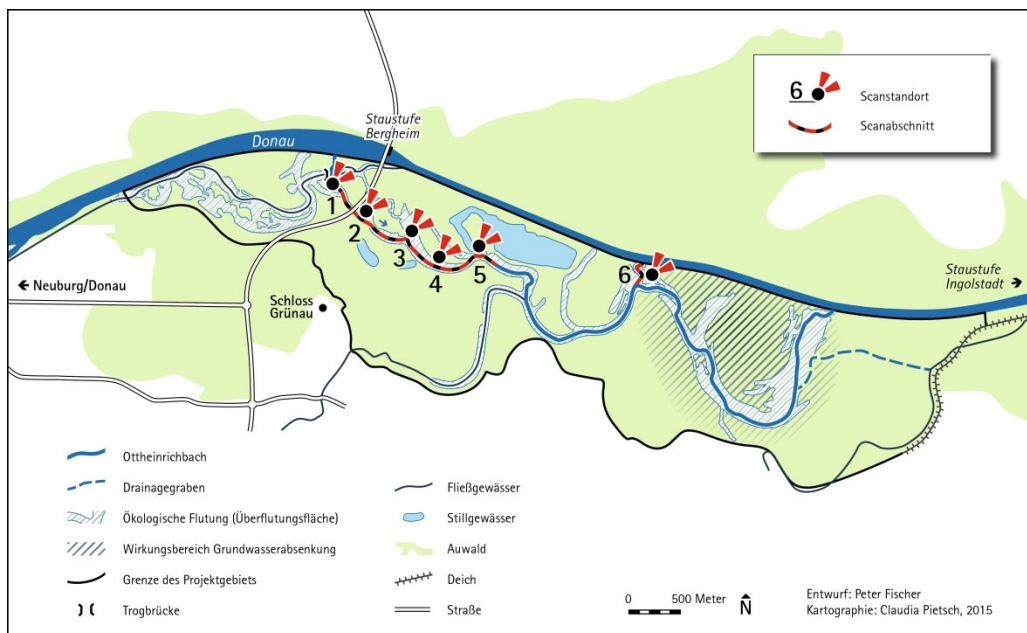


Abb. 6.2-21: Scanstandorte im Untersuchungsgebiet.

Für alle Standorte werden nur die „signifikanten“ Oberflächenveränderungen angegeben, also die über dem errechneten *Level of Detection (LoD)* liegen. Für die Darstellung der Veränderung wurde, wie bereits im Kapitel 5 erläutert, das *Significance Difference Grid* über dem jeweiligen *Analytical Hillshade* der vorangegangenen Aufnahme platziert. So ist eine bessere räumliche Darstellung möglich. In den *Significance Difference Grids* sind entsprechend nur die Gridzellen, die jeweils in beiden Aufnahmen einen Wert aufweisen, in den Abbildungen sichtbar.

Die Farbskala wurde, wenn erforderlich, entsprechend angepasst, um eine bestmögliche Visualisierung zu ermöglichen, und entspricht daher nicht den Maxima- und Minima-Werten, die im Text angegeben werden.

Tab. 6.2-7: Scanstandorte mit Anzahl der Aufnahmen und den gesamten Scanpositionen über alle Aufnahmen an den Scanstandorten.

Scanstandort	Aufnahmen	Anzahl Aufnahmen	Anzahl Scanpositionen
Trogbrücke (TB)	A→F	6	25
Radbrücke 1 (RB)	A→E	5	12
Radbrücke 2	A→C	3	9
Wegekreuzung (WK)	A→I	9	24
Am QP 17-20 (AQP)	A→D	4	8
Wetterloch (WL)	A→I	9	26
1. Rückleitung (ERL)	A→Z	26	59
Gesamt	7 Standorte	62	163

Neben der Darstellung der DGM und der DoD wird über eine Tabelle das Ergebnis der „Cut and Fill“-Analyse präsentiert. Aus diesen Tabellen können, wie im Kapitel 5.2.4 erklärt, die Oberflächenveränderungen des jeweiligen Standortes abgelesen werden.

Im Folgenden wird auf drei wesentliche Einflussfaktoren (Starkniederschlag, Abfluss und Umbaumaßnahmen) eingegangen, die je nach Standort eine unterschiedliche Auswirkung haben und eine Veränderung der Oberfläche maßgeblich mit beeinflussen können. In diesem Zusammenhang sei auch nochmals auf die Problematik des variierenden Wasserstandes hingewiesen, der immer eine Einschränkung des betrachteten Ausschnittes mit sich bringt. Bei besonderen Auswirkungen (Einschränkungen) an einzelnen Standorten wird deshalb explizit noch einmal darauf eingegangen.

Starkniederschläge im Untersuchungszeitraum

Starkniederschläge spielen auch außerhalb des Gerinnebetts eine wichtige Rolle. Insbesondere im Ufer- und Gewässernahbereich kann es unter besonderen Bedingungen (z. B. Ausbildung hydrophober Eigenschaften nach längeren Trockenperioden) zur Bodenerosion kommen (RAUTHE 2014). Dies führt zu erheblich höheren Oberflächenabflussraten und kann lokal auch zur linienhaften Erosion führen. Für den Zeitraum vom 01.01.2010 bis 31.12.2014 wurden sechs Starkregenereignisse mit über 30 mm Niederschlag am Tag an der Station Nassenfels aufgezeichnet (Abb. 6.2-22).

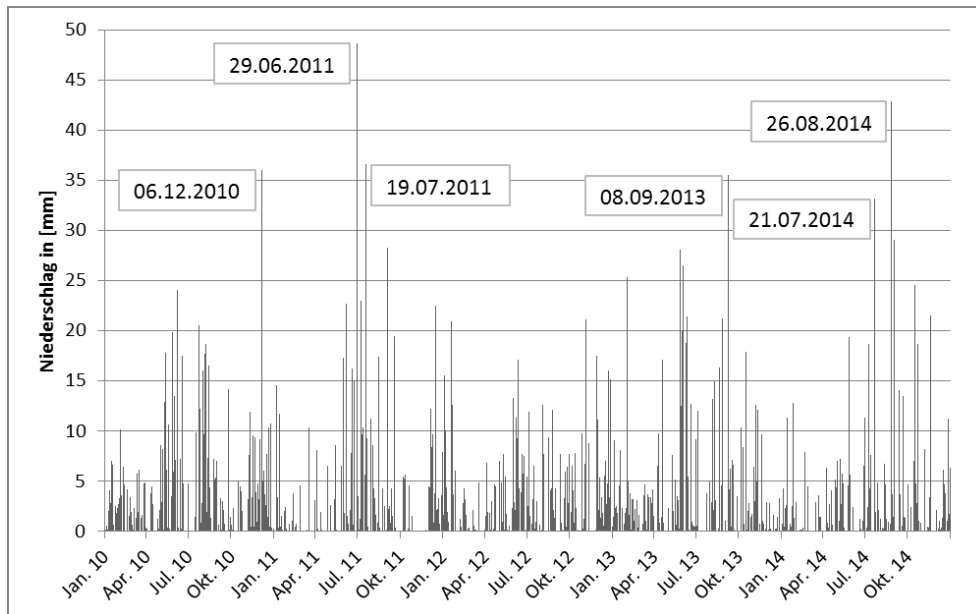


Abb. 6.2-22: Niederschlag über 30 mm am Tag an der Station Nassenfels (Daten DWD LFU-GKD 2015).

Steuerung der Ausleitungsmengen

Im Kapitel 4.2.2 wurden bereits die planfestgestellten und aufgrund von Betriebsvorschriften festgesetzten Steuerungen angesprochen und im Kapitel 6.2.1 zum Teil noch weiter ausgeführt. Für die morphologische Entwicklung spielen besonders die höheren Abflüsse eine entscheidende Rolle. Die Variation der Ausleitungsmengen im OHB (Tab. 4-5 und Abb. 6.1-6) und auch die Reaktion bei einer ÖF wurden bereits ausführlich dargestellt werden. Dennoch soll an dieser Stelle noch einmal kurz der Fokus auf die maximalen Abflüsse gerichtet werden, da sie als wesentlicher Faktor für die Erosionsprozesse zu betrachten sind. Für den Zeitraum vom 09.06.2010 bis 31.12.2013 konnten 54 Tage mit der maximalen Ausleitungsmenge von etwa $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ermittelt werden. Nur vier davon fallen in einen Zeitabschnitt, der nicht direkt mit einer ÖF oder dem natürlichen Hochwasser 2013 in Verbindung steht. Auch wenn während einer ÖF deutlich höhere Abflüsse erfolgen, sind Tage kurz vor bzw. nach einer ÖF mit Abflüssen um die $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ebenfalls von Interesse, weil hohe Abflüsse allgemein als strukturprägend angesehen werden können. Hier fallen zwei besonders lange Abschnitte (inkl. des Flutungszeitraumes) auf, der eine vom 18.12.2012 bis 31.12.2012 mit 13 Tagen, der zweite vom 01.06.2013 bis 21.06.2013 mit 20 Tagen. Bei der Analyse der Scanaufnahmen der „1. Rückleitung-Prallhang“ werden diese entsprechend berücksichtigt, da hier die meisten Messungen vorliegen. In den Übersichtstabellen zu den jeweiligen Standorten wird zusätzlich eine Abschätzung der Wasserstände nach den Angaben in Tabelle 6.2-8 vorgenommen.

Tab. 6.2-8: Wasserstände zu den Scanaufnahmen im Zeitraum vom 09.06.2010 bis 19.07.2013.

Abfluss (Ausleitungsbauwerk)	Wasserstand (Pegel Trogbrücke)	Anzahl Tage	Wasserstand während TLS Messung
< 2 m ³ /s	< 374,74 m	261	niedrig
> 2 m ³ /s < 3,5 m ³ /s	> 374,74 m < 374,84 m	445	mittel
> 3,5 m ³ /s	> 374,84 m	401	hoch

Ergänzend wird die Wasserstandsganglinie vom jeweils benachbarten Pegelstandort mit den entsprechenden Scanaufnahmen des Standortes gezeigt.

Umbaumaßnahmen und andere anthropogene Veränderungen

Verschiedene anthropogen bedingte Veränderungen während der Projektlaufzeit wurden bereits angesprochen und werden z. T. wenn nötig Erwähnung finden. Zur Übersicht werden die für die TLS-Ergebnisse maßgeblich zu berücksichtigenden Eingriffe und Maßnahmen in Tabelle 6.2-9 zusammengefasst.

Tab. 6.2-9: Umbaumaßnahmen an den Scanstandorten.

Eingriff/Maßnahme	Betroffener Bereich Scanstandort	Zeitangabe	Auswirkungen
Umbau	Trogbrücke	13.09.2010- 17.09.2010	Massiver Eingriff in die Morphologie (Abb. 4-18) und in die Strömungsverhältnisse
Errichtung eines Steinriegels	Trogbrücke	17.06.2010- 16.07.2010	Temporäre, kurzzeitige Störung der morphologischen und hydraulischen Verhältnisse im Bereich der Gewässersohle
Fahrspuren	Wegekreuzung	k. A.	Veränderung des natürlichen Ablagerungsbereiches (Verdichtung)
Errichtung einer Holzbrücke	Wetterloch	09.11.2010- 25.07.2011	Verdeckung wesentlicher Scanbereiche, später „unnatürliche Sollbruchstelle am Ufer“ durch Spaltenbildung (durch Holzpflocke)
Abdichtung der Ufer	nach Wetterloch	k. A.	Auswirkungen für Folgeaufnahmen
Entnahme der Betonringe	Rückleitung	07.04.2011- 23.01.2012	Kurzzeitiger Eingriff mit Veränderungen an der Gewässersohle und lokal im Prallhangbereich

Für eine Auswertung der einzelnen Scanstandorte werden die wesentlichsten Veränderungen, die aus den Detailbetrachtungen hervorgehen, zusammengefasst und teilweise mit hydrologischen Ereignissen verknüpft.

6.2.4.2.2. „Trogrücke“

Der Standort an der „Trogrücke“ (TB) (siehe Kapitel 4.3) setzt sich je nach Aufnahme-kampagne aus 4-5 Scanpositionen zusammen, die zusammen den kompletten Bereich nach der TB umfassen (2. Teilabschnitt im 1. Abschnitt, siehe Kapitel 4.3). Der Standort umfasst eine Fläche von 1679,66 m². Die unbeträchtlichen Datenlücken wurden über die *Close Gaps* Funktion in SAGA GIS geschlossen. Wie bereits erwähnt, muss der Umbaumaßnahme (Abb. 4-18) besonders Rechnung getragen werden. Deswegen erscheint es sinnvoll, die Ergebnisse in zwei getrennten Zeiträumen, „vor Umbau“ und „nach Umbau“, zu betrachten. Nach der Erstaufnahme (A) erfolgten zwei Aufnahmen (B und C) vor dem Umbau (Abb. 6.2-24) und drei Aufnahmen nach dem Umbau (D, E und F) (Abb. 6.2-26), was insgesamt zu sechs Aufnahmen am Standort TB führt.

Tab. 6.2-10: Scanaufnahmen und Anzahl der Scanpositionen am Scanstandort „Trogrücke“.

Aufnahme	Datum	Tage zwischen den Aufnahmen	Anzahl Scanpositionen	Wasserstand
A	21.05.2010		4	kein Wasser
B	17.06.2010	27	5	mittel
C	16.07.2010	29	4	mittel
D	09.11.2010	116	4	mittel
E	17.02.2011	100	4	niedrig
F	25.07.2012	524	4	niedrig
A-F		796	25	

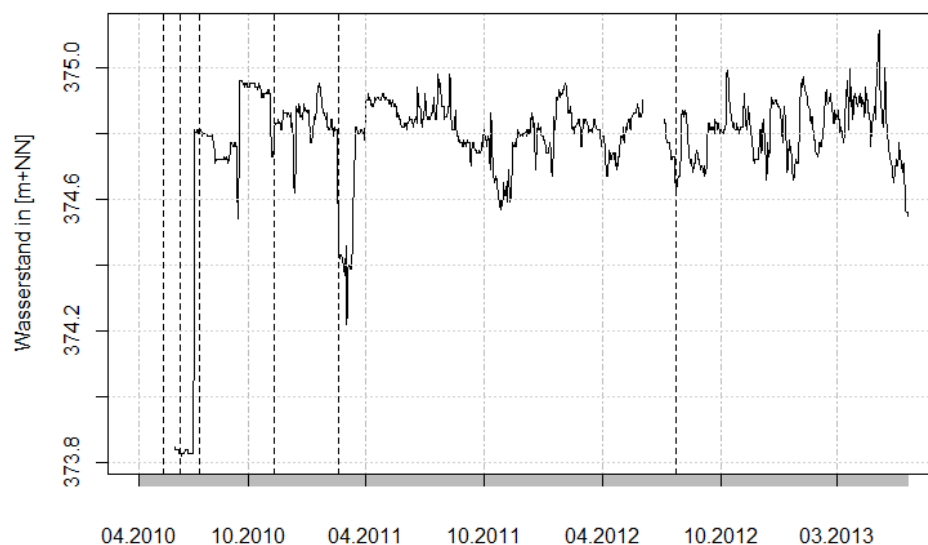


Abb. 6.2-23: Wasserstandsganglinie an der „Trogrücke“ mit eingezeichneten Zeitpunkten (gestrichelte Linie) der TLS-Aufnahmen.

Aufnahme A→B:

Zwischen der Erstaufnahme des Gerinnes im Mai 2010 und der zweiten Aufnahme im Juni 2010 konnte vor allem eine deutliche Erosion (bis zu 50 cm) an der Uferlinie festgestellt werden, die sich auf beiden Seiten entlang des Wasserspiegelanschlagpunktes bewegt. In der Summe ergibt sich ein Volumen von rund $13,8 \text{ m}^3$. Bei genauerer Betrachtung fällt teilweise eine Konzentration an den Außenkurven auf, wobei auch an den Innenkurven ein Abtransport von Material festzustellen ist. Insgesamt überwiegt die Erosion an der orographisch linken Flussseite im Vergleich zur Erosion an der rechten Seite deutlich. Die Akkumulation beträgt $2,7 \text{ m}^3$.

Weitere relevante Beobachtungen sollen als Detailbetrachtung im Folgenden stichpunktartig erwähnt werden. Über eine Nummerierung können diese Betrachtungen dann direkt mit der entsprechenden Graphik abgeglichen werden.

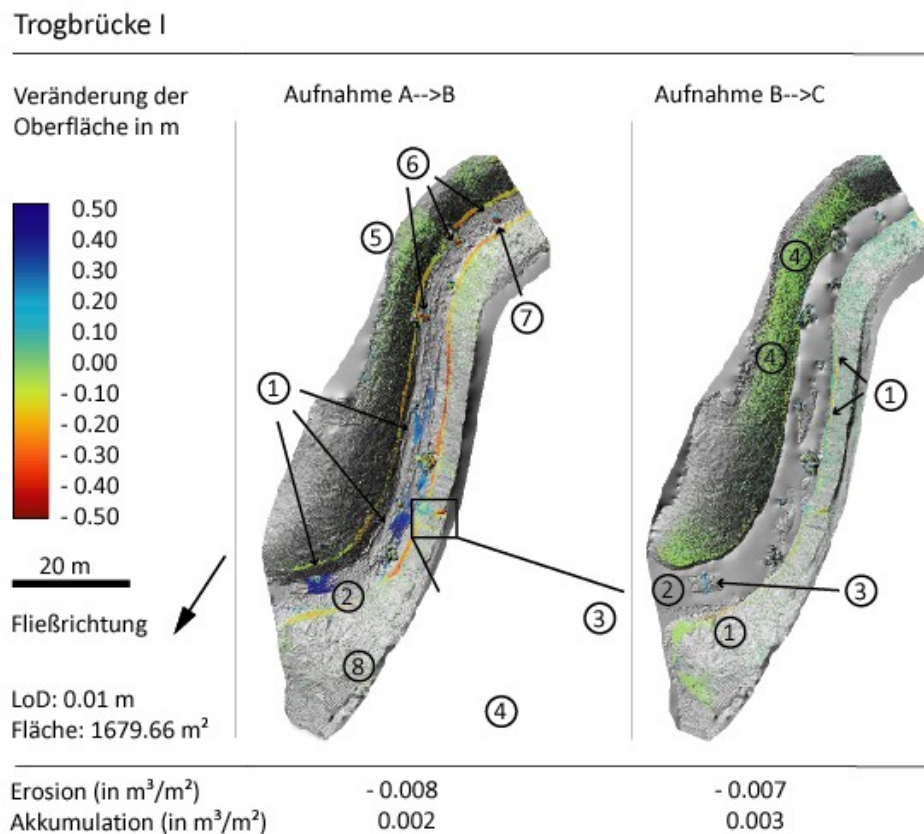


Abb. 6.2-24: Veränderungen der Oberfläche an der „Trogbrücke“ vor Umbau (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis C, siehe Tab. 6.2-10). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-24):

- (1) Akkumulation von vier bis fünf Kiesbänken, die sich, bis auf eine, alle hinter Störsteinen befinden.

- (2) Bei der untersten Kiesbank wird ein Zuwachs von 60 cm gegenüber der ehemals gebauten Gewässersohle gemessen werden. Die anderen Kiesbänke flussaufwärts nehmen an Höhe über der Gewässersohle bis auf rund 30 cm ab.
- (3) Erosion und Akkumulation am orographisch linken Ufer zwischen Kiesbank zwei und drei (von unten, entgegen der Fließrichtung gezählt). Diese „Hangrutschung“ führte zu einem Einschneiden von bis zu 60 cm (rote Zellen) und zu einer Akkumulation am Böschungsfuß von 25-30 cm (hellblaue Zellen) (Abb. 6.2-25, links, in Abb. 6.2-4 Bild A).
- (4) Direkt daneben befindet sich eine Erosionsrinne (Gully) von 4 m Länge und bis zu 30 cm Tiefe.
- (5) Am Ufer- und Gewässernahbereich kann eine flächenhafte Setzung des Materials angenommen werden (> 5 mm, noch keine Vegetation).
- (6) Anlandung und Rückhalt von diversem Material (insbesondere Totholz) an den Störsteinen. Ein Zuwachs kann an fast allen Hindernissen und immer an der Strömung zugewandten Seite detektiert werden.
- (7) Setzung (Absinken in die Gewässersohle) der Störsteine ist auch in den Rohdaten (Scanpunktwolke) gut nachzuvollziehen (Abb. 6.2-25, rechts).
- (8) Im *Analytical Hillshade* der Erstaufnahme sind die von der Baggerschaufel hinterlassenen Spuren zu erahnen, in Abb.6.2-25, (rechts) deutlich zu sehen.

Veränderungsgrid A→B (Abb. 6.2-28):

- (I) Die Gewässersohle ist nur bei Aufnahme A sichtbar (orange Zellen). Gut zu erkennen ist die entstandene Kiesbank, grün eingefärbt.
- (II) Runde Flächen mit reduzierter Punktdichte stellen die Standorte der jeweiligen Scanposition dar.

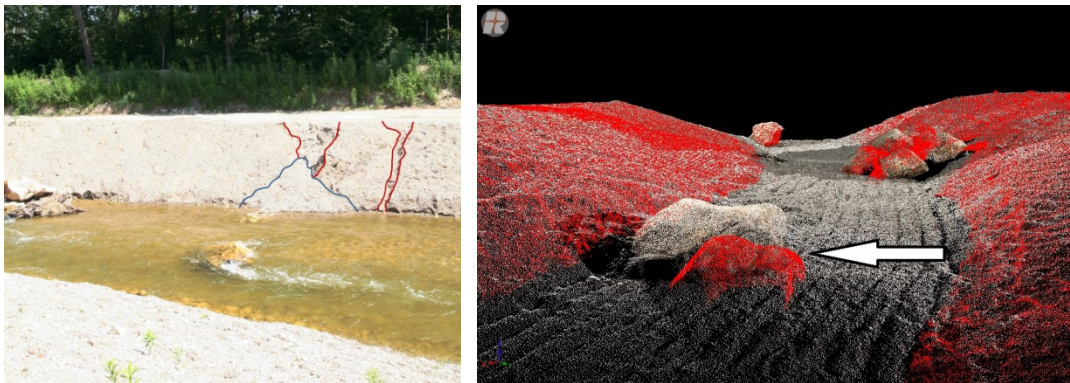


Abb. 6.2-25: Veränderungen im Gerinnebett zwischen Aufnahme A→B: Links: Erosion in den Uferbereichen, Erosionsbereiche = rot, Akkumulationsbereich (Schwemmfächer) = blau (Foto: Peter Fischer, 2012). Rechts: Störsteinsetzung an der „Trogbrücke“: Rote Punktwolke der Zweitaufnahme (Aufnahme B) zeigt die deutliche Verkippung und Absenkung eines Störsteines in den TLS- Rohdaten (Pfeil).

Aufnahme B→C:

Beim Vergleich der zweiten (Juni 2010) und dritten Aufnahme (Juli 2010) ist deutlich weniger Veränderung messbar. Die Gerinnegeometrie hat sich nur gering verändert (Abb. 6.2-24). Aufgrund fehlender Werte, die durch das Scannen der Wasseroberfläche entstanden sind, konnten im Gerinnebett nur die Bereiche, die über der Wasseroberfläche lagen, gemessen werden. Die Bereiche ohne Werte wurden über die *Close Gaps* Funktion in SAGA GIS für

eine anschaulichere Darstellung interpoliert und sind nun als geschlossene homogene Fläche in der Abbildung 6.2-24 zu sehen. Dies gilt auch für die folgenden Abbildungen.

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-24):

- (1) Vereinzelt tritt eine geringe Erosion an der Uferlinie auf.
- (2) Die deutlichste „Akkumulationsform“ ist der von Besuchern gebaute Steinriegel, der quer über die untere Kiesbank führt (weitere Ausführungen zum Sachverhalt siehe unten).
- (3) Aufgrund des höheren Wasserstands während der Aufnahme C ist keine Veränderung der Kiesbank messbar – außer dem eben angesprochenen Steinriegel, der über die Wasseroberfläche ragt.
- (4) Eine weitere Absackung des Materials konnte vor allem am rechten Ufer gemessen werden.

Veränderungsgrid B→C (Abb. 6.2-28):

- (I) Grüne Kiesbänke und Störsteine in der oberen Hälfte der Abbildung zeigen sich zu beiden Aufnahmezeitpunkten, während die Kiesbank in der unteren Hälfte sich weiterentwickelt (gewachsen) hat und daher blau eingefärbt ist.
- (II) Der etwas geringere Wasserstand bei Aufnahme C (blau) als bei B (orange) wird sichtbar, da im unteren Uferbereich die blaue Uferlinie unter der grünen liegt.

Aufnahme C→D:

Zwischen den Aufnahmen C und D erfolgte der schon mehrmals angesprochene Umbau. Vor allem im oberen Bereich haben sich morphologische Veränderungen ergeben, die auch mittels TLS erfasst werden konnten. Bei der Betrachtung des Abschnittes muss auch der etwas höhere Wasserstand der Aufnahme C, im Vergleich zu B und D, berücksichtigt werden. Nach der Umbaumaßnahme dominieren selbstverständlich die durch den Umbau ausgelösten Veränderungen. Diese sind demnach dort am größten, wo auch die stärksten Veränderungen stattfanden, insbesondere auf der linken Uferseite direkt nach der TB (Abb. 6.2-26).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-26):

- (1) Deutlich sichtbar sind die Folgen an der linken Uferseite, wo es aufgrund der Flussaufweitung im Zuge der Umbaumaßnahme im oberen Abschnitt zu einem Materialverlust (Entnahme) von bis zu 70 cm kommt.
- (2) Auch der Störsteinersatz und -austausch durch eingebaute Steinriegel ist im Rahmen der Umbauaktion vollzogen worden, kann aber „system- und anwendungsbedingt“ nicht im *Significance Difference Grid* gezeigt werden.
- (3) Die bereits bekannte Erosionslinie entlang des Ufers bleibt bestehen bzw. wurde weiter erodiert. Im Zeitraum zwischen Juli 2010 und November 2011 konnte wieder eine Erosion von über 30 cm an der Uferkante gemessen werden.
- (4) Der Steinriegel vom Juli 2010, der durch das *Analytical Hillshade* sichtbar ist, ist im November 2011 nicht mehr zu sehen. Unklar ist, ob er im Zuge der Umbaumaßnahmen abgebaut oder durch weitere Sedimentumlagerung auf natürliche Weise verschüttet wurde. Die Veränderung ist in der Abbildung 6.2-28 gut nachvollziehbar (oranger Steinriegel = Aufnahme C→D Nr. II).

- (5) Die von der Aufnahme A zu B entstandene Rutschung am linken Ufer wurde im Zuge der Baumaßnahmen wieder aufgefüllt und kann entsprechend als Zuwachs gemessen werden.

Veränderungsgrid C→D (Abb. 6.2-28):

- (I) Die Folgen der Umbaumaßnahmen sind entsprechend gut sichtbar: Der neu angelegte Steinriegel (blau) und die in Aufnahme C noch vorhandene Uferböschung (orange) wurden entfernt. Auch beim zweiten Steinriegel, der sich zuerst grün („auf orange“), dann mit einer blauen Spitze in die Gerinnemitte zieht, kann der Umbau in die Riegel-Becken-Bauweise nachvollzogen werden.
- (II) Der in der Aufnahme B→C bereits sichtbare Steinriegel ist in der Aufnahme C→D, bzw. bei C (orange) immer noch vorhanden. Bzw. bei D nicht mehr vorhanden.
- (III) Die Kiesbank war zum Aufnahmezeitpunkt C noch „nicht vorhanden“, lag jedoch vermutlich nur knapp unterhalb der Wasserlinie. In Aufnahme D ist sie deshalb blau eingefärbt (vgl. Erläuterungen bei Aufnahme B→C, II).

Trogbrücke II

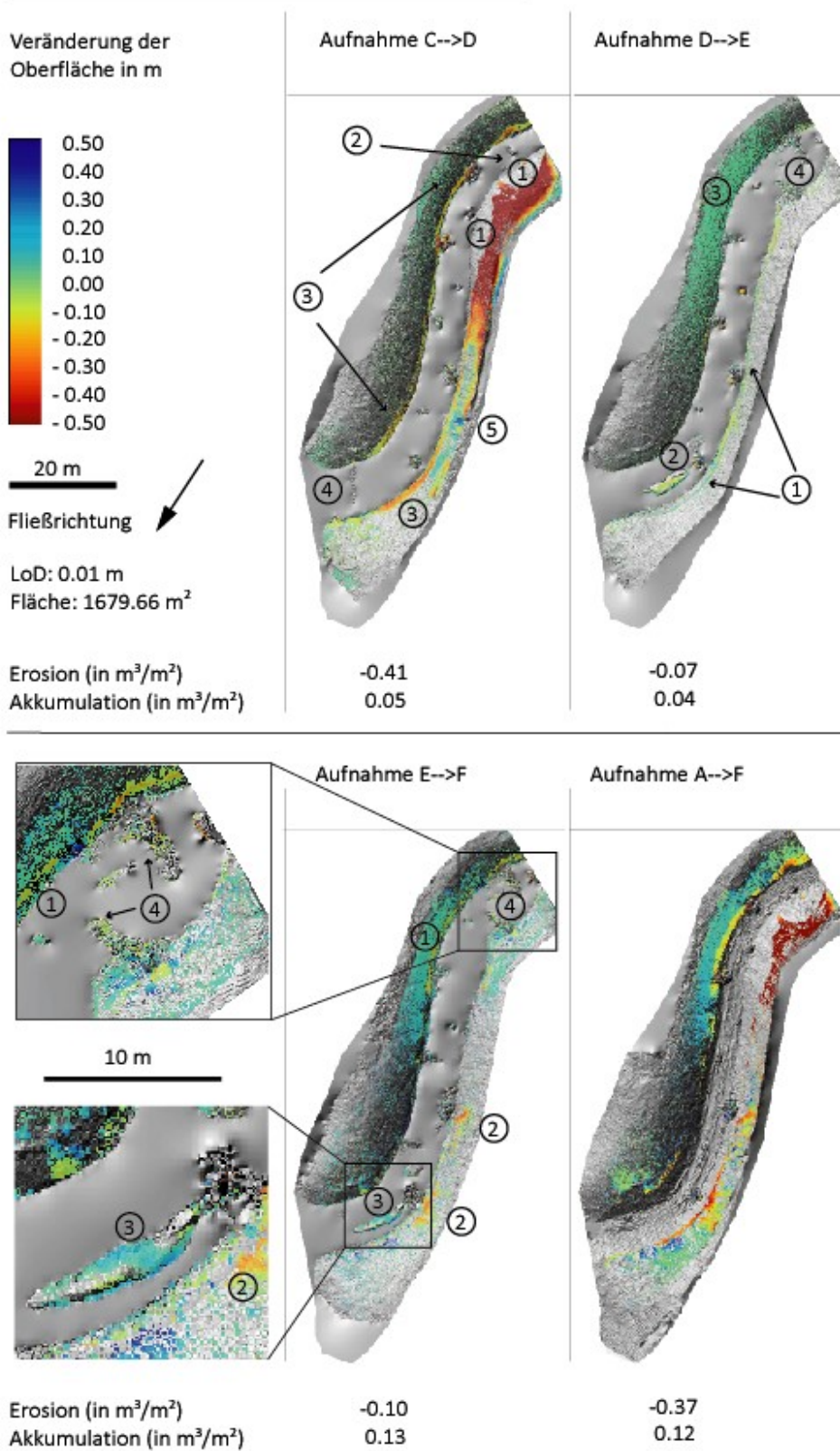


Abb. 6.2-26: Veränderungen der Oberfläche an der „Trogbrücke“ nach Umbau (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen C bis F, siehe Tab. 6.2-10). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Aufnahme D→E:

Bei Betrachtung der Abbildung 6.2-26 fällt die im Vergleich deutlich reduzierte Veränderung der Gerinnegeometrie auf.

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-26):

- (1) An der Uferlinie ist weiterhin – wenn auch sehr eingeschränkt – eine (negative) Veränderung (Erosion) messbar.
- (2) Die beiden unteren Kiesbänke sind durch das *Analytical Hillshade* zu sehen, aber ihr Zuwachs von D→E ist „noch“ nicht sichtbar.
- (3) Der Zuwachs am rechten Ufer- und Gewässernahbereich im mm-Bereich auf der rechten Seite deutet eher auf einen systematischen Fehler in der Registrierung und der Griderzeugung hin als auf aufkommende Vegetation, da die Vegetation auch links wachsen müsste. Auch diverse Kontrollen, bis zurück zu den Rohdaten, konnten den Sachverhalt nicht eindeutig klären.
- (4) Der deutlich breitere Bereich nach der „Trogbrücke“ mit den Steinriegeln ist jetzt im DGM zu sehen (siehe auch Detailausschnitt der Aufnahme E→F).

Veränderungsgrid D→E (Abb. 6.2-28):

- (I) In den Scanaufnahmen und den Fotos lassen sich in Aufnahme E besonders viele Totholzakkumulationen ausmachen, die im Veränderungsgrid als blaue Zellen vor den gemeinsamen grünen Zellen (oft Kiesbänke, die im Vergleich zum Totholz langlebiger sind) sichtbar werden.
- (II) Diese Kiesbank hat sich von der Aufnahme D (orange) zur Aufnahme E (blau) an die Flussaußenseite verlagert. Der gemeinsame Kern der Kiesbank ist grün. In der Aufnahme ist auch zu sehen, dass der Wasserstand etwa gleich niedrig war (grüne Uferlinie).

Aufnahme E→F:

Im Vergleich zum vorherigen Beobachtungszeitraum ist die zunehmende Veränderung deutlicher erkennbar. Mit $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ liegen die Werte zwar weit hinter den nach Umbau gemessenen Umlagerungsraten, aber deutlich über den $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2$ am Anfang. Zusätzlich ist zwischen diesen beiden Aufnahmen die Vegetation erheblich gewachsen, was in der Aufnahme vom Juli 2012 besonders deutlich zu erkennen ist, wodurch ein sehr lückenhaftes DGM entsteht (Abb. 6.2-26).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-26, inklusive Detailausschnitt):

- (1) Auch hier ist Erosion an der Uferlinie im oberen Abschnitt auf der Seite des rechten Ufers zu beobachten (gelb-oranger Streifen).
- (2) An zwei Stellen treten eher punktuell Erosionszonen mit bis zu 30 cm auf.
- (3) Akkumulation findet an den Rändern statt (Zuwachs zwischen 10-20 cm), in der Mitte der Insel kann aber Erosion von etwa 10 cm (grünliche Farbtöne) detektiert werden.
- (4) Im Detailausschnitt sind die künstlich geschaffenen Steinriegel deutlich zu sehen, die sich bis in die Gewässermitteln ziehen.

Veränderungsgrid E→F (Abb. 6.2-28):

- (I) Im oberen Bereich sind im Strömungsschatten der Steinriegel neue Kiesablagerungen entstanden, die bei niedrigen Wasserständen über die Wasseroberfläche reichen. Diese sind in Abb. 6.2-26 (nochmal im Vergleich) nicht detektierbar.

Aufnahme A→F:

Die am FG-Abschnitt „Trogbrücke“ gemessene Oberflächenveränderung zwischen der Erstaufnahme im Mai 2010 und der sechsten Aufnahme im Juli 2012 ist mit 53,03 m³ Erosion und 18,29 m³ Akkumulation relativ hoch. Bezogen auf die jeweils von Erosion bzw. Akkumulation betroffenen Flächen ergeben sich 0,37 m³/m² und 0,11 m³/m², für die Gesamtfläche von 1279,66 m² bedeutet dies eine Volumenveränderung von 0,03 m³/m² bzw. 0,01 m³/m². Wegen des Umbaus sind diese Werte nur mit gewissen Einschränkungen für Vergleiche zu verwenden. Dennoch lassen sich schnell die Bereiche ausmachen, an denen wenig Veränderung am Gerinneprofil stattgefunden hat. Danach können aktivere und weniger aktive Zonen unterschieden werden. Ein scheinbar stabilerer Bereich befindet sich mittig auf der linken Uferseite. Zum Überblick sind die drei wesentlichen Ergebnisse nochmal in Abbildung 6.2-27 in 3D-Ansicht und der Tabelle 6.2-11 zusammengefasst.

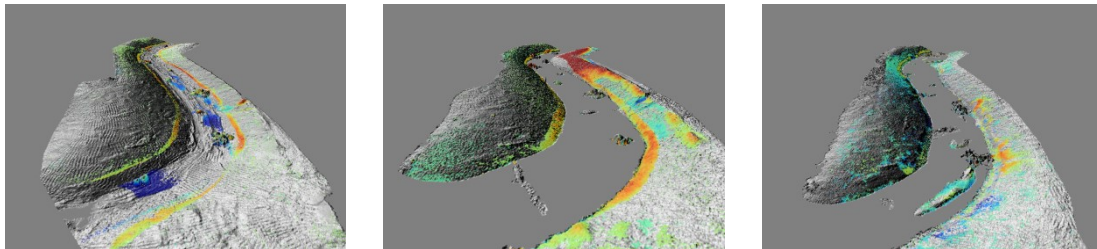


Abb. 6.2-27: Veränderungen der Gerinneoberfläche an der „Trogbrücke“ in 3D-Ansicht. Links: A→B, mitte: C→D und rechts: E→F (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis F, siehe Tab. 6.2-10).

Tab. 6.2-11: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis F am Scanstandort „Trogbrücke“

Typen	Fläche in m ²	Volumen in m ³	Volumen bezogen auf 1m ² der „Cut and Fill-Fläche“ in m ²	Volumen bezogen auf 1m ² der Gesamtfläche in m ²	Volumen der Gesamtfläche in t
Erosion nicht detektierbar	32,30	0,40	124,69	2,40	0,6
Akkumulation nicht detektierbar	41,73	0,57	136,63	3,39	0,9
Erosion	142,78	53,03	3713,96	315,71	81,7
Akkumulation	155,06	18,29	1179,75	108,91	28,2

Oberflächenveränderung	297,84	-34,74	-1166,26	-206,80	53,5
Gesamtfläche	1679,66				

Beim Vergleich der Oberflächenveränderungen zwischen der ersten und der letzten Aufnahme und der Summe der Oberflächenveränderungen der einzelnen Betrachtungszeiträume (Mai bis Juni 2010, Juni bis Juli 2010, Juli bis November 2010, November 2010 bis Februar 2011 und Februar 2011 bis Juli 2012) sind Unterschiede der gemessenen Akkumulation- und Erosionsraten festzustellen. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 7 näher behandelt.

Wie bereits bei der Einführung in die Methodik erläutert, wurden zur Veranschaulichung von dynamischen Strukturen an manchen Standorten sog. „Veränderungsgrids“ erstellt. Auf diese wurde schon im Rahmen der Detailbetrachtung verwiesen. In den einzelnen Aufnahmeperioden der Veränderungsgrids sind die in den *Significance Difference Grids* nicht sichtbaren Veränderungen besser zu erkennen (Abb. 6.2-28).

Trogbrücke Veränderungsgrids

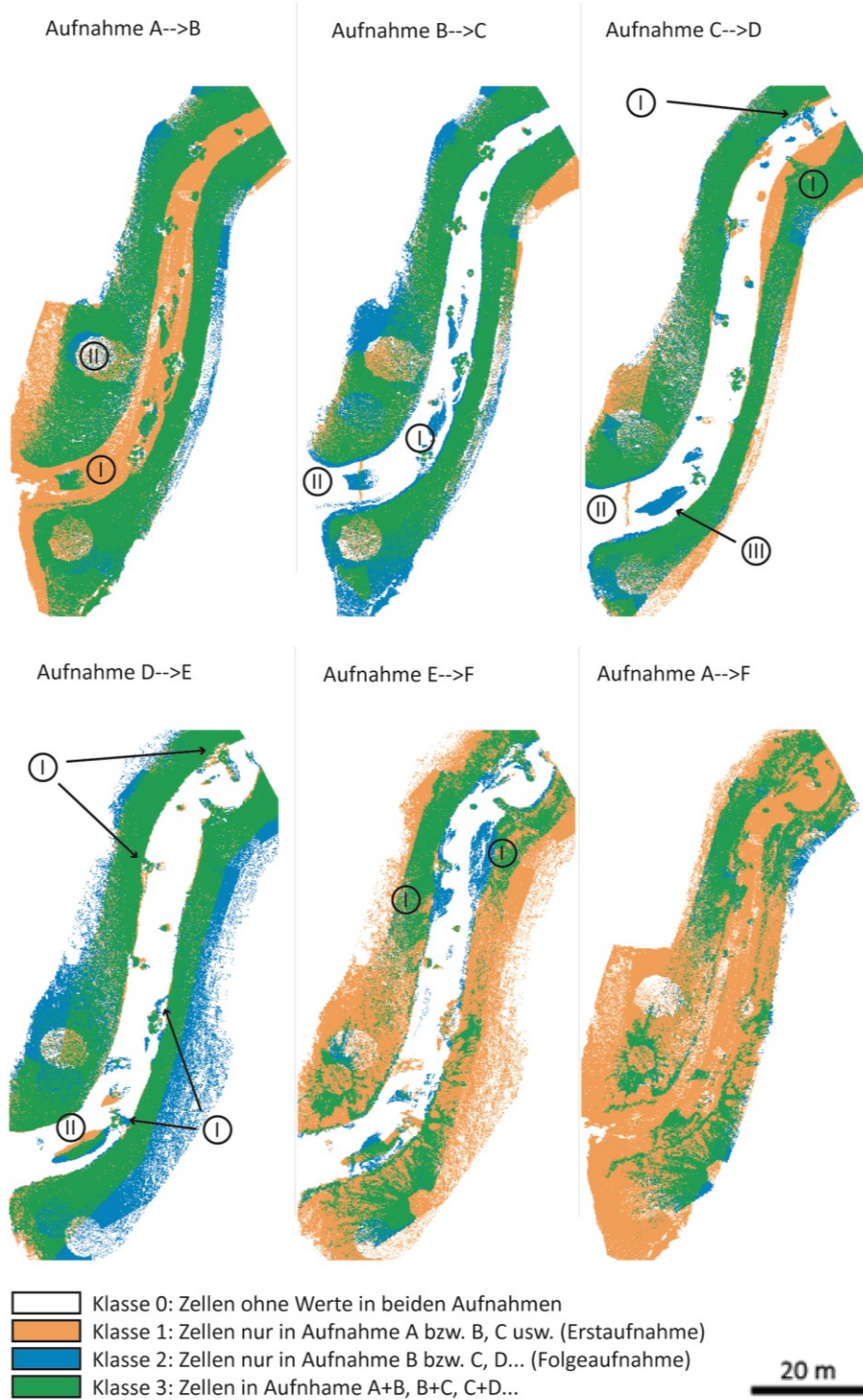


Abb. 6.2-28: Veränderungsgrids der Aufnahmen A→F an der „Trogbrücke“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis F, siehe Tab. 6.2-10). Zu den römischen Zahlen: siehe Erklärung im Text bei den jeweiligen Aufnahmen unter den Ausführungen zu Veränderungsgrids.

Synthese:

Zusammenfassend können aus den Detailbetrachtungen verschiedene Einzelprozesse herausgefiltert werden, von denen die über viele Aufnahmen hinweg zu erkennende Erosionslinie an den Ufern am auffallendsten ist (Abb. 6.2-24, links). Dabei konnte neben der Abhängigkeit von den Ausleitungsmengen auch eine weitere Erosion während und nach ÖF festgestellt werden (Aufnahme C→D). Dies deutet auf einen lokalen Rückstauereffekt durch zuströmendes Wasser aus der oberen Flutmulde hin, der auch so im Gelände beobachtet werden konnte. Bemerkenswert ist zudem die extrem schnelle Entwicklung von Bankstrukturen (innerhalb von 27 Tagen zwischen der Erst- und Zweitaufnahme, bzw. nach Fotodokumentation mit fünf Tagen noch wesentlich kürzer). Die größte Bank konnte sich in dem kurzen Zeitraum mehr als 60 cm über die Gewässersohle erheben. Bei niedrigen Ausleitungsmengen reicht sie auch über den Wasserspiegel. Die weitere Entwicklung und Verlagerung von diversen Bänken und Strukturen wurde bereits ausführlich beschrieben. Während des ersten Monats wurde auch über den ganzen Bereich verteilt eine Setzung des Materials detektiert, die exemplarisch an der Störsteinsetzung beschrieben worden ist (Aufnahme A→B, Punkt 7). Ein natürlicher Sedimenteintrag von den noch instabilen Ufern wurde durch die Erosionsrinne und die Hangrutschung festgestellt (Abb.6.2-25). Im weiteren Verlauf, auch nach der Umbauphase, gab es nur noch eine deutlich reduzierte morphologische Aktivität, die auch durch ÖF nicht wesentlich gesteigert wurde.

6.2.4.2.3. „Radwegbrücke“

Die „Radbrücke“ oder „Radwegbrücke“ ist der Ausgangspunkt, um zu den gleichnamigen Scanstandorten (Prallhang 1 und Prallhang 2) zu gelangen. Beim PH „Radbrücke 1“ handelt es sich um einen, bei der Gestaltung des Gerinnes relativ weitgezogenen PH (Kapitel 4.3, Abb. 4-19, links). Insgesamt wurde hier zu fünf unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen werden.

Tab. 6.2-12: Scanaufnahmen und Anzahl der Scanpositionen am Scanstandort „Radbrücke“.

Aufnahme	Datum	Tage zwischen den Aufnahmen	Anzahl Scanpositionen	Wasserstand
A	19.03.2010		2	kein Wasser
B	21.02.2011	339	3	niedrig
C	23.02.2011	2	4	niedrig
D	31.05.2012	463	2	hoch
E	13.06.2012	13	1	mittel
A-E		817	12	

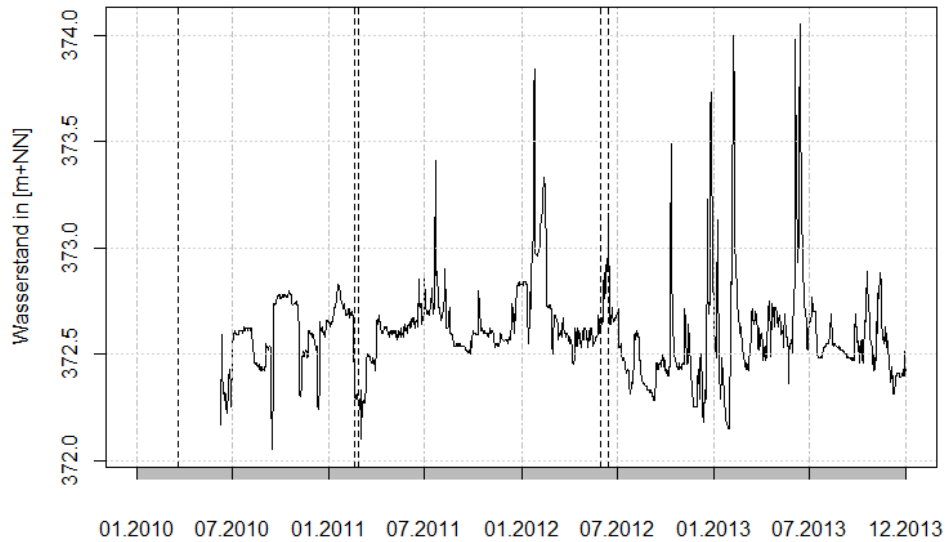


Abb. 6.2-29: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten (gestrichelte Linie) der TLS-Aufnahmen.

Wie in Abbildung 4-19 (Kapitel 4.3) ersichtlich, kam es schon vor der Aufnahme A zu Erosionserscheinungen durch gravitative Massenbewegung (ohne Wasser) durch Niederschlag und Frostwechselprozesse etc. Der Ablagerungsraum war kurzzeitig am Böschungsfuß, bevor dann das erste Wasser das Material weitertransportierte. Aufgrund des sich nach Inbetriebnahme einstellenden Wasserspiegels ist auch für die TLS-Auswertung nur ein entsprechend beschränkter Bereich verfügbar. Die Veränderungen dieses Standortes sind in Abbildung 6.2-30 dargestellt.

Radwegbrücke

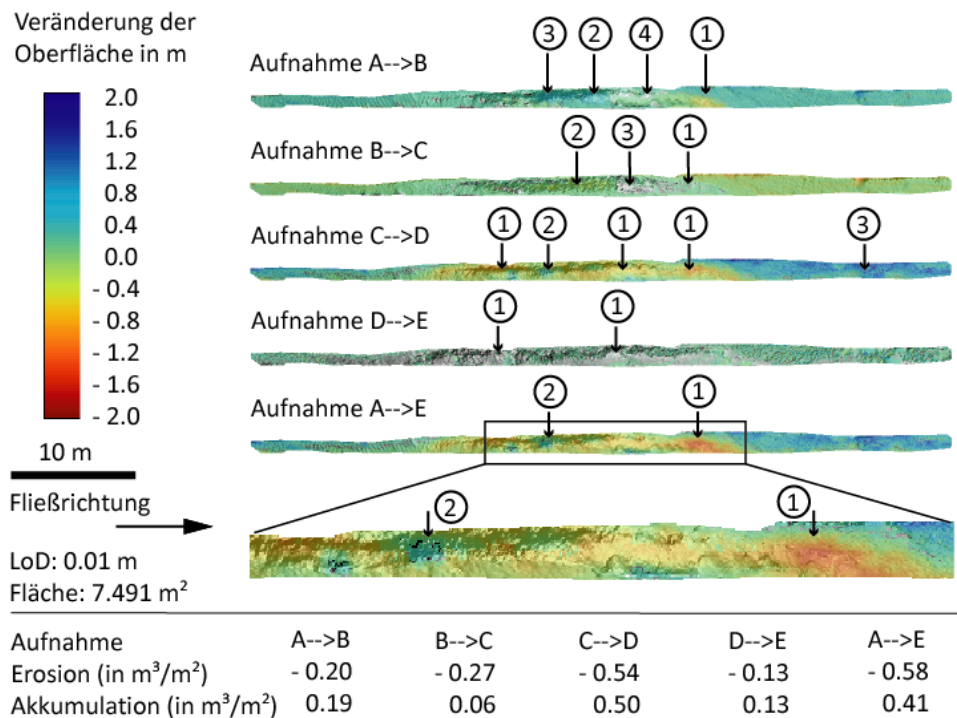


Abb. 6.2-30: Veränderungen am „Prallhang 1“ an der „Radbrücke“ im Profil (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen, siehe Tab. 6.2-12). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-30):

Aufnahme A→B

- (1) An der besonders aktiven Zone (etwas rechts von der Mitte) kommt es zu Erosionsprozessen und Hangrückverlagerungen von bis zu 80-90 cm.
- (2) Flussaufwärts davon kommt es zu einer Ausbildung einer Hohlkehle, die betroffene Fläche ist anhand der helleren Farbtöne zu erkennen.
- (3) Links von der Mitte bzw. der Hohlkehle wird ein Zuwachs (dunkelblaue Gridzellen) von 50 cm gemessen.
- (4) Fehlende Werte (grau) durch überhängende Vegetation sind bereits zwischen den ersten beiden Aufnahmen zu verzeichnen.

Aufnahme B→C:

- (1) Der Erosionsbereich von der Erstaufnahme hat sich nicht weiterentwickelt.
- (2) Eine Erosion mit ca. 50 cm findet jetzt im Bereich der Hohlkehle statt; die leichte Verlagerung flussaufwärts, die sich schon beim letzten Zeitschritt angedeutet hat, hat sich verstärkt.
- (3) Fehlende Werte durch überhängende Vegetation und Filterung (grau) im zentralen Bereich des PH bleiben erhalten.

Aufnahme C→D:

- (1) Die Erosion ist nun über die ganze Flussaußenkurve mit extremen Werten von bis zu 120 cm messbar.
- (2) Vereinzelt (Gridzellengröße) ist auch Zuwachs durch herabhängende Vegetation zu erkennen.
- (3) Am hinteren Ende (rechts) macht sich flächenhafter Zuwachs durch Vegetation bemerkbar.

Aufnahme D→E:

- (1) In dieser Aufnahmesequenz wird durch das durchscheinende *Hillshade* (= fehlende Werte in Aufnahme E) klar, dass eine Materialverlagerung aufgrund der Datenlücken nur noch schlecht messbar ist.
- (2) Es sind keine deutlichen Erosions- oder Akkumulationsbereiche zu verzeichnen, jedoch zeigt sich zunehmend auch Vegetation.
- (3) Trotzdem werden Veränderungen von bis zu 50 cm Erosion und rund 10 cm Akkumulation detektiert.

Aufnahme A→E:

- (1) Es findet Erosion von bis zu 1,8 m im zentralen Prallhangbereich statt.
- (2) Am Überhang und am Übergang zum Gewässerrandstreifen wird ein Zuwachs von Vegetation verzeichnet.

In der 3D-Ansicht wird die ausgeprägte Erosionszone mit Abbruchkante und das konkave Profil der Hohlkehle vor der Erosionszone deutlich sichtbar. Der Krümmungsradius wird ebenfalls deutlich herausgestellt (Abb. 6.2-31).

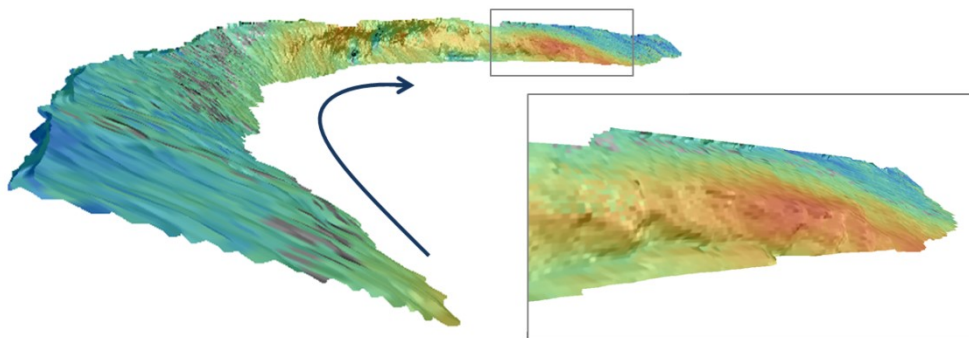


Abb. 6.2-31: Veränderungen am Prallhang 1 an der „Radbrücke“ zwischen den Aufnahmen A→E in 3D-Ansicht (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen, siehe Tab. 6.2-12).

Tab. 6.2-13: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis E am Scanstandort „Radwegbrücke“

Typen	Fläche in m ²	Volumen in m ³	Volumen bezogen auf 1m ² - der „Cut and Fill- Fläche“ in m ²	Volumen bezogen auf 1m ² der Gesamtfläche in m ²	Volumen der Gesamtfläche in t*
Erosion nicht detektierbar	1,66	0,02	0,01	0,00	0,031

Akkumulation nicht detektierbar	1,82	0,03	0,01	0,00	0,046
Erosion	41,65	23,98	0,58	0,32	36,9
Akkumulation	29,74	12,08	0,41	0,16	18,6
Oberflächenveränderung	71,40	-11,89	-0,17	-0,16	18,3
Gesamtfläche	74,91				

Auf Prallhang 2 an der „Radbrücke“ (Kapitel 4.3, Abb. 4-19, rechts) wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da keine wesentlichen neuen Erkenntnisse im Vergleich zum Prallhang 1 gewonnen werden konnten. Die Prozesse und Veränderungen verliefen ähnlich wie beim Prallhang 1.

Synthese:

Wie schon in der Einleitung zu diesem Standort (mit dem Verweis auf Abbildung 3-19) gezeigt, kam es schon vor der Wassereinleitung zu Abbrüchen am Prallhang. Schnell wurde das heruntergefallene Material abtransportiert, und die Hangunterschneidung durch Strömungserosion führte zur Ausbildung eines Überhanges und einer Hohlkehle. Diese Erosionszonen haben sich im weiteren Beobachtungszeitraum immer weiterentwickelt und vergrößert. Besonders maßgeblich beteiligt waren hier die beiden ÖF, die zwischen der Aufnahme C→D stattgefunden haben. Auch in der weiteren Beobachtung bleibt dieser Standort aktiv, was sich auch in der Veränderung des Querprofils zeigt. Ebenfalls in großem Ausmaß an den Umlagerungsprozessen beteiligt sind in diesem Bereich die vielen Sturzbäume (siehe Kapitel 6.2.2.1, Abb. 6.2-5).

6.2.4.2.4. „Wegekreuzung“

Beim Standort der „Wegekreuzung“ handelt es sich um eine Akkumulationsform in Form einer Sedimentzunge, die im Laufe der Beobachtungsperiode entstanden ist. Über neun Aufnahmezeitpunkte hinweg wurde ihre Entwicklung verfolgt.

Tab. 6.2-14: Scanaufnahmen und Anzahl der Scanpositionen am Scanstandort „Wegekreuzung“.

Aufnahme	Datum	Tage zwischen den Aufnahmen	Anzahl Scanpositionen	Wasserstand
A	19.05.2010		3	kein Wasser
B	22.02.2011	279	3	mittel
C	25.07.2011	153	3	hoch
D	26.01.2012	182	2	hoch
E	31.05.2012	126	4	hoch
F	03.01.2013	217	3	hoch
G	08.03.2013	64	3	mittel

H	07.06.2013	91	2	hoch
I	05.09.2013	90	1	niedrig
A-I		1205	24	

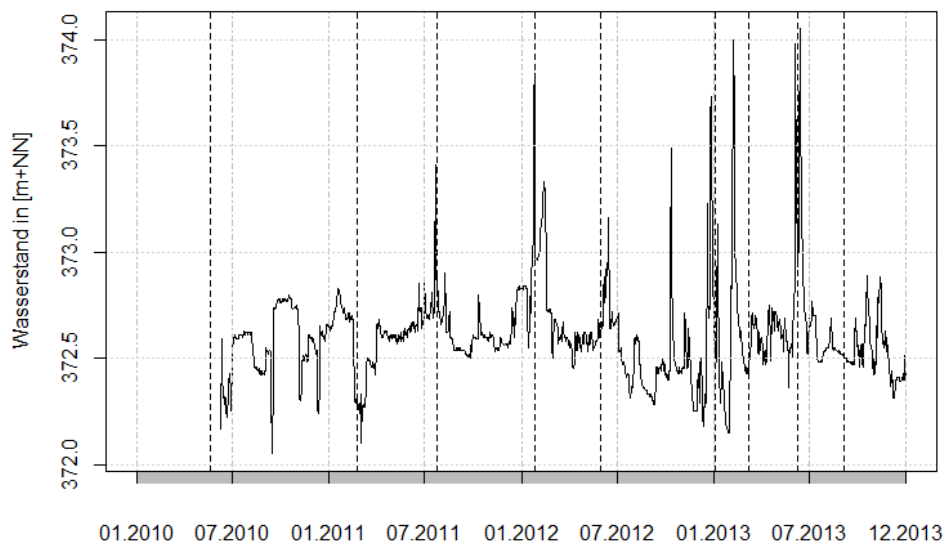
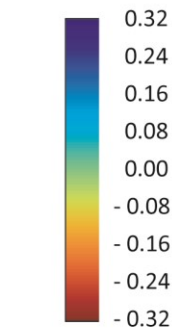


Abb. 6.2-32: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten (gestrichelte Linie) der TLS-Aufnahmen.

Die Ausbildung der Sedimentzunge erfolgte nach der ersten ÖF (Aufnahme C, zu sehen in der Abbildung 6.2-33 und der Aufnahmesequenz B→C). Das Material, welches zur Ausbildung dieser Akkumulationsform führte, stammte von der gesamten abgesenkten Fläche (Furt 3, Abb. 4-20, Kapitel 4), der Furt und dem kleinen Bereich jenseits des Weges.

Wegekreuzung I

Veränderung der Oberfläche in m



10 m
Fließrichtung
LoD: 0.01 m

Fläche (in m²)
Erosion (in m³/m²)
Akkumulation (in m³/m²)

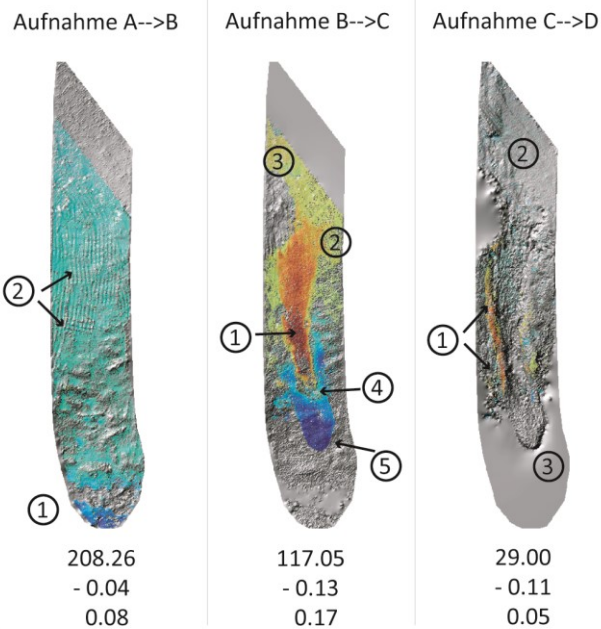


Abb. 6.2-33: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis D, siehe Tab. 6.2-14). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-33):

Aufnahme A→B

- (1) Während der Aufnahmeperiode kam es noch zu keiner ÖF, dennoch kann an der künftigen Spitze der sich entwickelnden Sedimentzunge bis zu 20 cm Akkumulation durch angeliefertes Sediment vom OHB (Hauptgerinne) gemessen werden. Daher kommt es auch zu einer Trennung durch eine Wasserfläche (grau) zwischen der Spitze und dem restlichen Teil der Akkumulationsfläche (2).
- (2) Zudem ist eine Verfüllung der Baggerspuren im Bereich von rund 3 cm erkennbar.

Aufnahme B→C

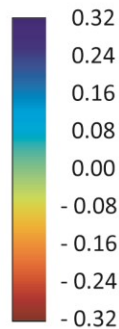
- (1) Die Aufnahme erfolgte kurz nach der 1.ÖF. Die Ausbildung der Sedimentzunge bzw. des Schwemmfächers ist deutlich zu erkennen. Es fand Erosion bis zu 35 cm (dunkelrot) statt.
- (2) Stromaufwärts (kurz nach der Furt, orange Farbtöne) wurden noch 15-20 cm Erosion gemessen werden.
- (3) Im oberen Einzugsbereich und an den Rändern fand eine Materialsetzung bis max. 5 cm statt.
- (4) Hier beginnt der Übergang vom Kolk (Erosion) zur Kiesbank (Akkumulation) mit 15-20 cm Akkumulation (hellblau).
- (5) An der Zungenspitze wurde eine Akkumulation mit bis zu 45 cm (dunkelblau) gemessen.

Aufnahme C→D:

- (1) Im vorderen Bereich an der rechten Uferseite konnte Erosion bis zu 30 cm, sonst deutlich geringer mit weniger als 20 cm, gemessen werden. Damit übertrifft die Breitenerosion die Tiefenerosion.
- (2) Die übrige Veränderung am Standort ist, durch Vegetation bedingt, schlecht oder gar nicht detektierbar.
- (3) Die Zungenfront konnte aufgrund eines zu hohen Wasserstandes zum Aufnahmezeitpunkt D nicht aufgenommen werden.

Wegekreuzung II

Veränderung der Oberfläche in m



10 m

Fließrichtung

LoD: 0.01 m

Fläche (in m²)

Erosion (in m³/m²)

Akkumulation (in m³/m²)

Aufnahme D→E

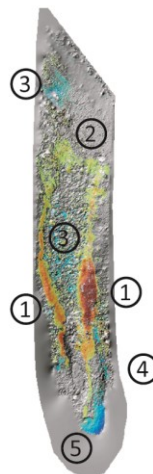


30.34

- 0.05

0.10

Aufnahme E→F

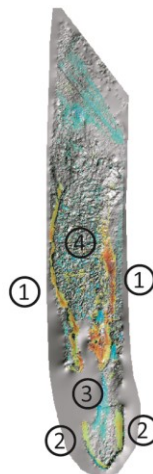


124.01

- 0.10

0.07

Aufnahme F→G



133.33

- 0.09

0.05

Abb. 6.2-34: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen D bis G, siehe Tab. 6.2-14). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-33):

Aufnahme D→E:

- (1) Das Material unterlag hier einer flächigen Setzung bis zu 5 cm.
- (2) Veränderungen an der Uferkante sind eher unwahrscheinlich. Die gemessenen vermeintlichen Veränderungen könnten einen Registrierungsfehler andeuten, der aber nicht verifiziert werden konnte. Denkbar wäre auch ein ungünstiger Eintreffwinkel (siehe Kapitel 2.4).
- (3) Über Fotos und die Rohdaten lässt sich die Ausbildung von zwei getrennten Wasserbecken erkennen, die aber aufgrund der fehlenden Werte in Aufnahme D nicht im *Significance Difference Grid* erscheinen.

Aufnahme E→F:

- (1) Es konnte wieder eine deutliche Erosion an den Seiten festgestellt werden, welche sich in Fließrichtung links über einen größeren Bereich ereignete (bis zu 40 cm). Dies

fürte insgesamt zu einer Aufweitung des Nebengerinnes fast über die ganze Lauflänge.

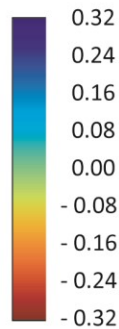
- (2) Zudem kam es auch erneut zu Tiefenerosion im oberen Bereich kurz nach der Furt.
- (3) Im Nebengerinne selbst war eine Veränderung durch punktuell aufkommende Vegetation schlecht messbar (türkise Gridzellen 5-10 cm). Dies kann den 3D-Scandaten entnommen werden (Abb. 6.2-34).
- (4) Die ehemals getrennten Becken haben sich zu einem großen Becken zusammengeschlossen.
- (5) Es fand eine deutliche Erweiterung an der Zungenfront bis zu 2,5 Meter in Richtung Brücke statt.

Aufnahme F→G:

- (1) Insgesamt zeigt sich wieder ein ähnliches Bild wie bei der letzten Aufnahmesequenz E→F. Es kam nochmal zu einer Erweiterung an den Seiten bis zu 30 cm.
- (2) An der Zungenfront fand eine Erniedrigung (Abflachung) bis zu 10 cm statt. Nur im Scan wird jedoch auch der Vorschub (Materialverlagerung) sichtbar, der durch fehlende Messwerte in Aufnahme F bei der Quantifizierung der Veränderung nicht berücksichtigt werden kann.
- (3) Auf der Zunge selbst lagerte sich Material von 10 cm ab.
- (4) Die inzwischen gewachsene Vegetation im Bett verhinderte eine sichere Quantifizierung der tatsächlichen Oberflächenveränderung unter den verwendeten Filteroptionen.

Wegekreuzung III

Veränderung der Oberfläche in m



10 m

Fließrichtung

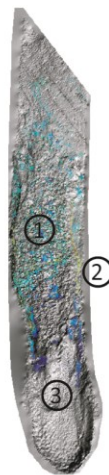
LoD: 0.01 m

Fläche (in m²)

Erosion (in m³/m²)

Akkumulation (in m³/m²)

Aufnahme G→H



57.78

-0.06

0.13

Aufnahme H→I



6.69

-0.23

0.23

Aufnahme A→I



50.91

-0.15

0.29

Abb. 6.2-35: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen G bis I, siehe Tab 6.2-14). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-35):

Aufnahme G→H:

- (1) Hier ist deutlich der Einfluss der aufkommenden Pappeln in den Aufnahmen sichtbar, fast nur Akkumulation kann detektiert werden.
- (2) Nur an der linken Seite ist geringe lineare Erosion zu messen.
- (3) Zusätzlich sind durch den hohen Wasserstand wenig „verwertbare“ Gridzellen vorhanden.

Aufnahme H→I:

- (1) Auch hier kann kaum noch Veränderung festgestellt werden, was unter anderem an dem bereits angesprochenen hohen Wasserstand lag. Ein Zuwachs bzw. eine Abnahme der Oberfläche ist vermutlich nur durch eine Veränderung der Vegetation gegeben.
- (2) Insgesamt konnten nur sehr geringe Veränderungen im Vergleich zur Aufnahme davor gemessen werden.

Aufnahme A→I:

Bei der Betrachtung des gesamten Zeitraumes wird die Entwicklung der Sedimentzunge besonders deutlich. Auch hier wird über ein 3D-Darstellung in Abbildung 6.2-36 die Akkumulationsform „Zunge“ besonders anschaulich.

Tab. 6.2-15: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis I am Scanstandort „Wegekreuzung“.

Typen	Fläche in m ²	Volumen in m ³	Volumen bezogen auf 1m ² - der „Cut and Fill- Fläche“ in m ²	Volumen bezogen auf 1m ² der Gesamtfläche in m ²	Volumen der Gesamtfläche in t*
Erosion nicht detektierbar	0,87	0,01	0,01	0,00	0,015
Akkumulation nicht detektierbar	1,18	0,02	0,02	0,00	0,031
Erosion	8,48	1,30	0,15	0,03	2,0
Akkumulation	40,38	11,69	0,29	0,23	18
Oberflächenveränderung	48,86	10,39	0,21	0,20	16
Gesamtfläche	je nach Aufnahme zwischen 6,69 und 208,26				

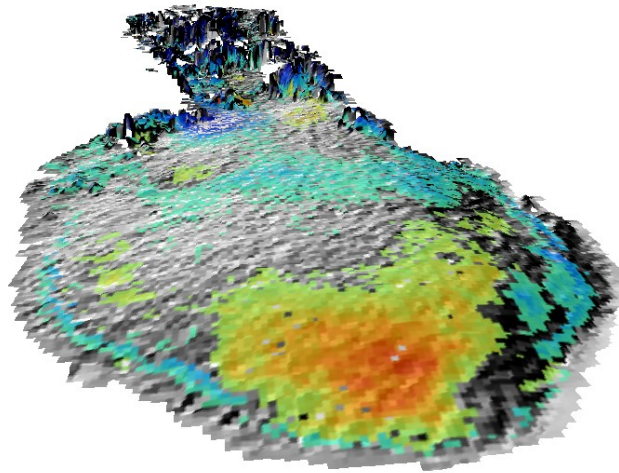


Abb. 6.2-36: Veränderungen an der „Wegekreuzung“ in 3D-Ansicht (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen D→G, siehe Tab. 6.2-14).

Synthese:

In der weiteren Entwicklung wurde eine Vergrößerung und ein Vorstoß der Sedimentzunge in Richtung Gerinnemitte von 6,5 m gemessen. Der Breitenzuwachs betrug etwa 3 m. Solange, wie offensichtlich, Sediment verfügbar war, blieb dieser Trend erhalten. Danach (nach der Aufnahme E) konnte nur noch eine deutlich reduzierte Aktivität gemessen werden. Da keine weitere Materialnachlieferung aus der Flutmulde kommen und auch kein weiteres Material mehr aus der Gerinnesohle gelöst werden kann, scheint ein Klimaxstadium erreicht zu sein. Es ist auch mit keiner weiteren größeren Veränderung mehr zu rechnen, was den Standortbedingungen geschuldet ist – von Vegetationszuwachs (hier Pappeln) abgesehen. Die Ausbildung der Form ist weitgehend abgeschlossen und Veränderungen sind jetzt nur noch kleinräumig und im cm-Bereich zu detektieren. Aufgrund der angewendeten Filtermethode und der manuellen Beschneidung war eine saubere Trennung der Vegetationspunkte nicht möglich.

6.2.4.2.5. „Prallhang am QP 17-20“

Zwischen der „Wegekreuzung“ und dem „Wetterloch“ wurde ein weiterer Scanstandort eingerichtet, der hier vor allem als Ergänzung zu den Querprofilen 17-20 zu verstehen ist und einen vom Auelehm dominierten Standort repräsentieren soll. Hier gibt es vier Aufnahmen zwischen 2010 und 2013.

Tab. 6.2-16: Scanaufnahmen und Anzahl der Scanpositionen am Scanstandort „Prallhang am QP 17-20“.

Aufnahme	Datum	Tage zwischen den Aufnahmen	Anzahl Scanpositionen	Wasserstand
A	18.03.2010		2	kein Wasser
B	04.03.2011	351	4	niedrig
C	31.05.2012	454	1	hoch
D	05.09.2013	462	1	niedrig
A-D		1267	8	

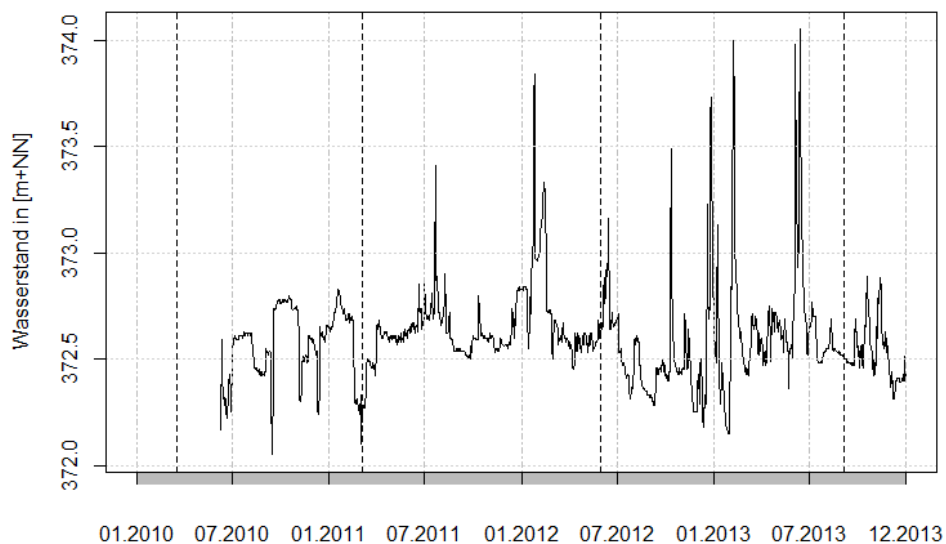


Abb. 6.2-37: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten (gestrichelte Linie) der TLS-Aufnahmen.

Bei diesem Standort handelt es sich aufgrund der am Ufer anstehenden Lehmschichten im Vergleich zu anderen Scanstandorten eher um einen stabileren Bereich trotz der Prallhangsituation. Bei der Bearbeitung wurden besonders drei Probleme offensichtlich, auf die im Kapitel 7 näher eingegangen wird, und die an dieser Stelle deshalb nur kurz erwähnt werden sollen, um die Interpretation besser nachvollziehen zu können:

- Überlagerung des Prallhangs durch herabhängende Vegetation und Wurzelteile. In der Erstellung des DGM ergeben sich dadurch entweder Bereichen ohne Werte oder ein Höhenmodell der Vegetationsbedeckung.
- Die Ausbildung der konkaven Hohlkehle im oberen Prallhangbereich ist nicht detektierbar.
- Messungengenauigkeit und Fehler durch schlechtere Registrierung, da aufgrund von fehlender oder in ihrer Lage veränderter Reflektoren nur eine manuelle Registrierung (*Coarse Registration*) möglich war.
- Aufgrund des hohen Wasserstandes bei vielen Aufnahmen konnte der interessante Bereich um die Mittelwasserlinie und die damit verbundene Ausbildung der Erosionsrinne (Hohlkehle) in den stabilen Tonschichten des Prallhangs nicht aufgenommen werden (Anhang 6.2-6).

Am Querprofil 17-20

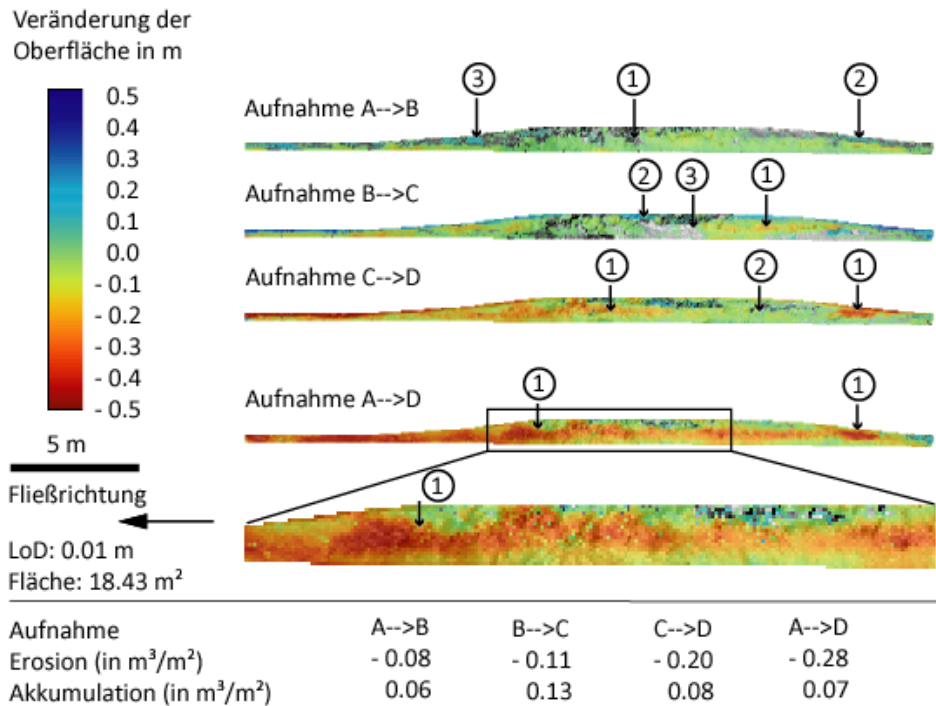


Abb. 6.2-38: Veränderungen am „Prallhang am Querprofil 17-20“ im Profil (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis D, siehe Tab. 6.2-16). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-38):

Aufnahme A→B:

- (1) Insgesamt ist wenig Veränderung auszumachen, der Hangbereich ist ziemlich stabil. Deutlich sind durch das durchscheinende *Hillshade* Datenlücken zu erkennen.
- (2) Am Prallhangbeginn können Werte um 10 cm bis maximal 20 cm Erosion gemessen werden.
- (3) Außerhalb des aktiven Prallhangbereichs konnte etwas Zuwachs mit 10 cm bis 15 cm detektiert werden.

Aufnahme B→C:

- (1) Im Vergleich zur Aufnahme A→B zeigt sich deutlich mehr Erosion, bis zu 30 cm, und es bilden sich Erosionszonen aus.
- (2) An der Böschungsoberkante wurde durch herabhängende Vegetation eine Oberflächenzunahme gemessen.
- (3) Durch die überhängenden Vegetation, die aus dem Scan entfernt werden konnte, entstehen Bereiche mit fehlenden Werten (graue Flächen).

Aufnahme C→D:

- (1) Eine Rückverlagerung von bis zu 50 cm konnte vor allem am Anfang und Ende des PH detektiert werden.
- (2) Insgesamt wurde nur wenig Veränderung aufgrund der oben angesprochenen Tonschichten gemessen.

Aufnahme A→D:

(1) Insgesamt wurden am Anfang und Ende des PH größere Bereiche, sowie Teile im zentralen Bereich erodiert (Hohlkehle).

Tab. 6.2-17: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis D am Scanstandort „Prallhang am Querprofil 17-20“.

Typen	Fläche in m ²	Volumen in m ³	Volumen bezogen auf 1m ² - der „Cut and Fill-Fläche“ in m ²	Volumen bezogen auf 1m ² der Gesamtfläche in m ²	Volumen der Gesamtfläche in t*
Erosion nicht detektierbar	0,29	0,00	0,02	0,00	0
Akkumulation nicht detektierbar	0,20	0,00	0,01	0,00	0
Erosion	17,62	4,87	0,28	0,26	7,5
Akkumulation	0,32	0,02	0,07	0,00	0,031
Oberflächenveränderung	17,94	-4,85	-0,27	-0,26	7,5
Gesamtfläche	18,43				

Synthese

Der im Auenlehm ausgebildete Prallhang ist im Vergleich zum Prallhang an der „Radwegbrücke“ eher stabil. Auch durch acht Flutungen kann insgesamt nur eine maximale Rückverlagerung des Ufers von 50 cm gemessen werden. Über die zusätzlich stabilisierende und überhängende Vegetation kommt es bei den Aufnahmen zu Schatteneffekten und fehlenden Werten. Über die Rohdaten der Aufnahmen kann eine deutliche Erosionsrinne (Hohlkehle) im Bereich um die Mittelwasserlinie festgestellt werden.

6.2.4.2.6. „Wetterloch“

Der Standort „Wetterloch“ wurde bereits in anderen Arbeiten behandelt (z. B. STAMMEL et al. 2012, FISCHER und CYFFKA (in press)), allerdings noch nicht mit allen neun zur Verfügung stehenden Aufnahmen.

Tab. 6.2-18: Scanstandort „Wetterloch“ mit Scanaufnahmen

Aufnahme	Datum	Tage zwischen den Aufnahmen	Anzahl Scanpositionen	Wasserstand
A	27.04.2010		4	kein Wasser
B	17.05.2010	20	3	niedrig
C	17.06.2010	31	3	niedrig
D	16.07.2010	29	4	mittel
E	09.11.2010	116	5	mittel
F	08.03.2011	119	2	niedrig
G	25.07.2011	139	1	hoch
H	23.01.2012	182	2	hoch
I	31.01.2013	374	2	hoch
A-I		1010	26	

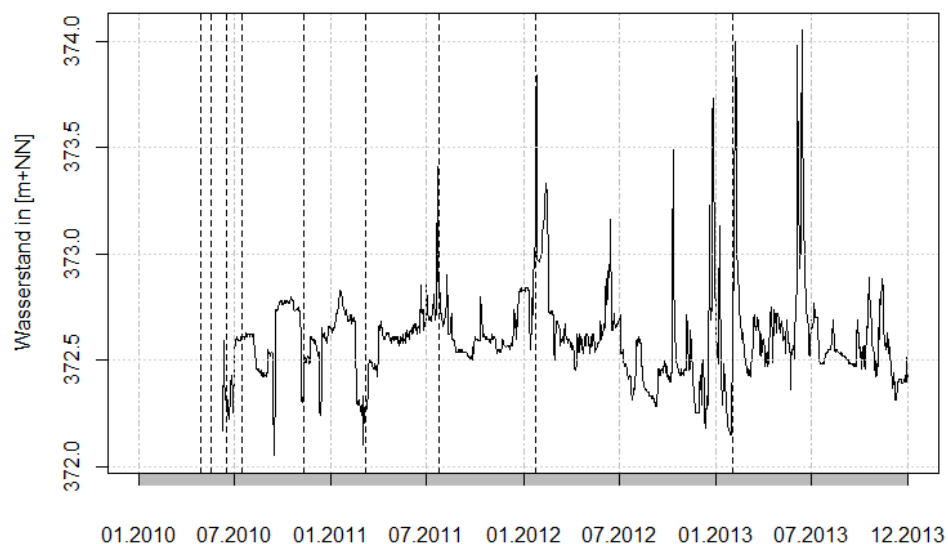


Abb. 6.2-39: Wasserstandsganglinie an der „Wegekreuzung“ mit eingezeichneten Zeitpunkten (gestrichelte Linie) der TLS-Aufnahmen.

Für einen Zeitraum von 7 Monaten (27.04.2010 bis zum 09.11.2010) konnte für die Aufnahmen A→E bereits ein Erosionsvolumen von 13,3 m³ berechnet werden (vgl. STAMMEL et al. 2012). Nach den anfangs hohen Erosionsraten und der Aufweitung an der Engstelle sowie Erosion am gegenüberliegenden Ufer stellte sich bereits nach einem Jahr (noch vor der ersten ÖF) ein Zustand mit geringer Dynamik, also mit wenig Oberflächenveränderung und Umlagerungsprozessen, ein (vgl. FISCHER und CYFFKA (in press)). Auch bei den nachfolgenden ÖF wurde nur wenig Material an den Ufern erodiert (Gleichgewichtsbreite). In einer detaillierten Betrachtung der Aufnahmen können einzelne Prozesse herausgearbeitet werden.

Wetterloch

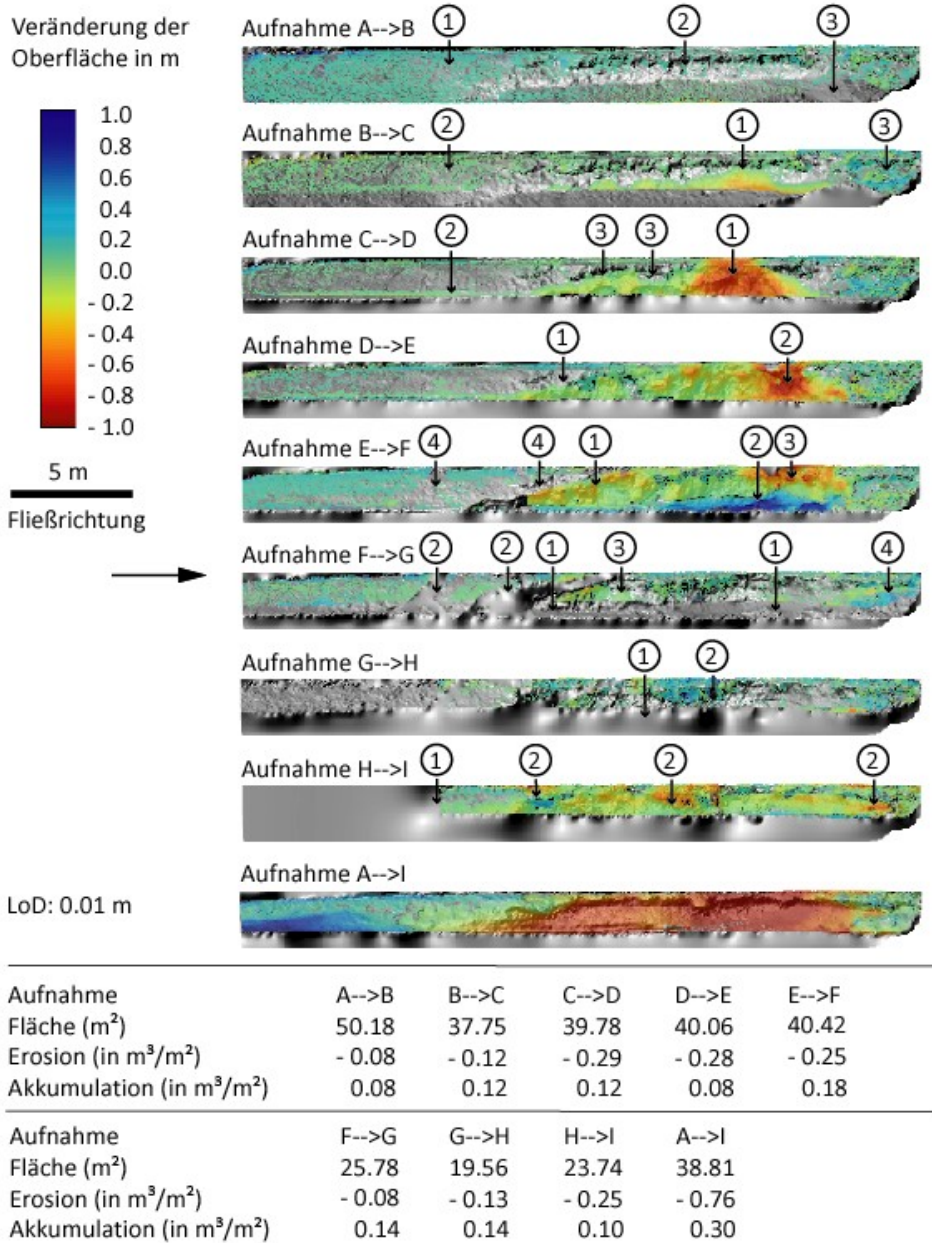


Abb. 6.2-40: Veränderungen am „Wetterloch“ im Profil (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis I, siehe Tab. 6.2-18). Erläuterungen zu den Ziffern erfolgen im Text (Detailbetrachtung).

Detailbetrachtung (Abb. 6.2-40):

Aufnahme A→B:

- (1) Während der ersten Aufnahmeperiode kam es kaum zu Veränderungen. Falls doch eine Veränderung stattfand, war dies meist ein Zuwachs zwischen 3 bis 5 cm, zu sehen an den flach geneigten Uferbereichen noch vor der Engstelle.
- (2) Da sich in dieser Phase noch kein Wasser im System befand, sind auch hier wie am Prallhang an der „Radbrücke“ die Abbrüche auf gravitative Massenbewegungen zurückzuführen.

- (3) Zu beiden Aufnahmezeitpunkten konnte ein großer vertikaler Bereich gescannt werden, wobei auch Teile von der Gerinnesohle erfasst wurden.

Aufnahme B→C:

- (1) Die erste Wassereinleitung führte zum Abtransport von zuvor heruntergefallenem Material. Die Erosion am Hangfuß betrug bis zu 50 cm und an der Hohlkehle der Prallhangwand konnte der Beginn der Erosion festgestellt werden.
- (2) In diesem Bereich wurde im Gegensatz zum vorherigen Zeitraum Erosion von 3 cm bis 5 cm detektiert.
- (3) Am Ende des PH fand etwas Zuwachs durch Vegetation statt.

Aufnahme C→D:

- (1) Der bereits in den Aufnahmen zuvor angedeutete Kolk konnte sich weiter über die ganze Prallhanghöhe ausbilden (oben 1,5 m unten 3,5 m). Die Erosion betrug zwischen 70 und 80 cm.
- (2) An der unmittelbaren Uferlinie konnte im 4 cm bis 5 cm Bereich Erosion erfasst werden.
- (3) Zwei weitere Anbrüche (hier 20 cm bis 25 cm) konnten stromaufwärts festgestellt werden. Insgesamt beträgt der Erosionsbereich über 10 m.

Aufnahme D→E:

- (1) Der Kolk wurde stromaufwärts erweitert.
- (2) Am unteren Ende erfolgte eine Erweiterung stromabwärts und es fand eine Rückverlagerung des PH um über 1 m statt.

Aufnahme E→F:

- (1) Die Kolke entwickelten sich weiter und es erfolgte ein Zusammenschluss der beiden einzelnen Anbrüche (Kolke) und zunehmend auch eine Vergrößerung.
- (2) Am Hangfuß sammelte sich Material, das im Bereich der Prallhangoberkante abgebrochen war.
- (3) Auch an der oberen Kante fand Erosion statt.
- (4) Zum Zeitpunkt der Aufnahme F war schon der Brückenbau erfolgt, weshalb hier keine Werte im *Significance Difference Grid* enthalten sind.

Aufnahme F→G:

- (1) Zum Zeitpunkt der Aufnahme G war der Wasserstand relativ hoch, was sich im *Significance Difference Grid* bemerkbar macht.
- (2) Die errichtete Holzbrücke schattete einen Teil des Scanbereichs ab. Dies zeigt sich auch im *Significance Difference Grid* bzw. im *Hillshade*.
- (3) Es zeigten sich sonst nur geringe Veränderungen im Bereich von 4 cm bis 6 cm.
- (4) Am Ende des Prallhangs konnte in den Messungen wieder mehr Zuwachs durch Vegetation verzeichnet werden.

Aufnahme G→H:

- (1) Aufgrund des kleinen Scanausschnitts konnte nur wenig Veränderung gemessen werden. Auch der Hangfuß war nicht sichtbar (unter Wasser). Grundsätzlich erscheint der Hang in diesem Zeitabschnitt eher stabil und mit einer Erosion und Akkumulation zwischen 4 cm und 10 cm relativ ausgeglichen.
- (2) Im *Significance Difference Grid* sind auch Wurzeln zu erkennen.

Aufnahme H→I:

- (1) Zum Zeitpunkt der Aufnahme H war die Brücke inzwischen wieder weggebrochen. Aufgrund des hohen Wasserspiegels war der zu betrachtende Ausschnitt immer noch sehr klein.
- (2) An drei bis vier Bereichen konnte Erosion bis zu 70 cm und mehr gemessen werden.

Aufnahme A→I:

- Über die gesamte Aufnahmeperiode sind die Ablagerungen auf dem Gleithang (blau) und die Überhänge (Hohlkehle) am Prallhang (rot) deutlich sichtbar.

Über den gesamten Zeitraum von zweidreiviertel Jahren (27.04.2010 bis 31.01.2013) konnte eine Volumenveränderung von 22,5 m³ Erosion am Prallhang und 3,3 m³ (Akkumulation) am Gleithang von einer Fläche von knapp 39 m² berechnet werden.

Tab. 6.2-19: Ergebnistabelle der Aufnahmen A bis I am Scanstandort „Wetterloch“ Ergebnistabelle

Typen	Fläche in m ²	Volumen in m ³	Volumen bezogen auf 1m ² - der „Cut and Fill-Fläche“ in m ²	Volumen bezogen auf 1m ² der Gesamtfläche in m ²	Volumen der Gesamtfläche in t*
Erosion nicht detektierbar	0,87	0,01	0,01	0,00	0,015
Akkumulation nicht detektierbar	0,92	0,01	0,01	0,00	0,015
Erosion	29,67	22,59	0,76	0,53	34,8
Akkumulation	10,94	3,33	0,30	0,08	5,1
Oberflächenveränderung	40,61	-19,26	-0,47	-0,45	29,7
Gesamtfläche	je nach Aufnahme zwischen 19,56 und 50,18				

Synthese:

Wie am Prallhang „Radwegbrücke“ kam es auch hier schon vor der Wassereinleitung zu Abbrüchen an der künstlich geschaffenen Engstelle. Auf der hier näher betrachteten Seite (in Fließrichtung links) kam es durch Strömungserosion zur Ausbildung eines Überhanges und einer Hohlkehle. Diese Erosionszonen haben sich im Beobachtungszeitraum weiter entwickelt, zusammengeschlossen und vergrößert. Eine Erweiterung kann sowohl in als auch gegen die Fließrichtung erfolgen. Als Folge hat sich die ehemalige Engstelle in ihrer Ausdehnung verdoppelt und auch die Uferlinie hat eine deutliche Veränderung erfahren. Verantwortlich waren hier allerdings nicht die ÖF, sondern die Abflüsse im OHB. Die erste ÖF und die damit einhergehenden erhöhten Fließgeschwindigkeiten und veränderten Strömungsrichtungen wurden erst nach der Aufnahme F wirksam. Zu diesem Zeitpunkt war die „aktive“ Phase morphologischer Veränderung bereits abgeschlossen.

6.2.4.2.7. „1. Rückleitung-Prallhang“

Der am häufigsten aufgenommene Abschnitt ist der Prallhang an der „1. Rückleitung“. Hier liegen 26 Scanaufnahmen vor, die teilweise auch bis zu sechs Einzelscanpositionen umfassen und damit die Entwicklung eines längeren (220 m) Fließgewässerabschnittes (Teilabschnitt 4.1, Kapitel 4.3 Abb. 4-23) nachvollziehbar machen.

Bei bisherigen Arbeiten (vgl. FISCHER et al. 2012A, STOCKER 2014, FISCHER & CYFFKA (in press)) stand der Prallhang bzw. Ausschnitte davon im Fokus (siehe Abb. 6.2-42). Nachdem auch in vorliegender Arbeit bereits Erosions- und Akkumulationsbereiche identifiziert und ausgewertet wurden und auch Volumen berechnet worden sind, soll an dieser Stelle zunächst die Rückverlagerung des Hanges nach Betrachtung 1, über die zurückweichende Uferkannte, (Kapitel 5.2.4.3) und später die eigendynamische Entwicklung der ganzen Gewässerstrecke (Betrachtungsweise 4, Kapitel 5.2.4.3, Abb. 5-24) im Vordergrund stehen.

Tab. 6.2-20: Scanaufnahmen und Anzahl der Scanpositionen am Scanstandort „1. Rückleitung“.

Aufnahme	Datum	Tage zwischen den Aufnahmen	Anzahl Scanpositionen	Wasserstand
A	09.11.2010		1	mittel
B	18.02.2011	101	1	niedrig
C	08.03.2011	18	1	niedrig
D	07.04.2011	30	1	hoch
E	23.01.2012	291	1	hoch
F	24.01.2012	1	1	hoch
G	25.01.2012	1	2	hoch
H	26.01.2012	1	1	hoch
I	25.05.2012	154	1	hoch
J	31.05.2012	6	1	hoch
K	13.06.2012	13	6	mittel
L	14.06.2012	1	3	mittel
M	25.06.2012	11	2	mittel
N	25.07.2012	30	5	niedrig
O	24.10.2012	91	1	mittel
P	05.11.2012	12	2	hoch
Q	03.01.2013	59	3	hoch
R	31.01.2013	28	2	mittel
S	08.03.2013	36	3	mittel
T	22.04.2013	45	6	hoch
U	28.05.2013	36	2	hoch

V	05.06.2013	8	5	hoch
W	07.06.2013	2	2	hoch
X	12.06.2013	5	2	hoch
Y	19.06.2013	7	2	mittel
Z	13.12.2013	177	2	niedrig
A-Z		1130	59	

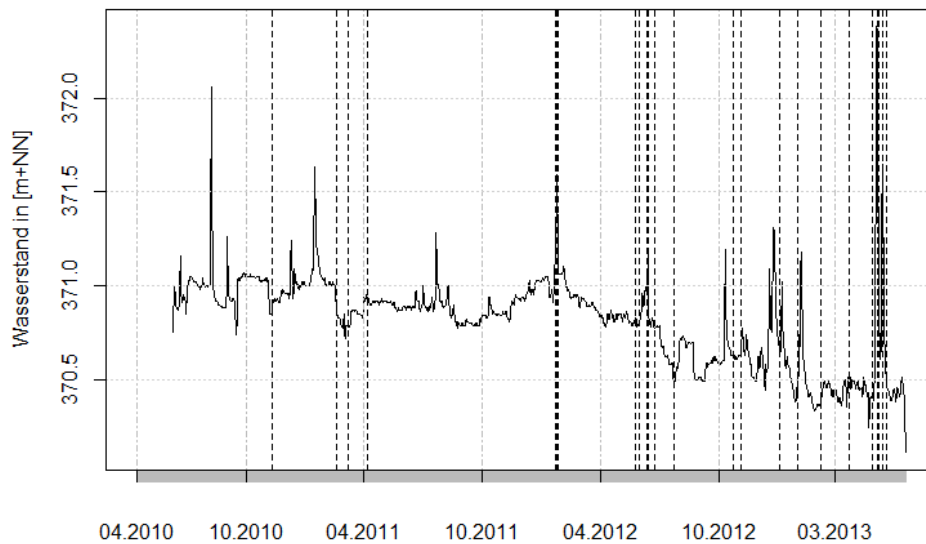
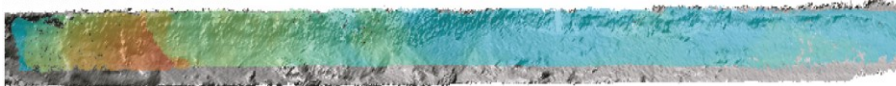


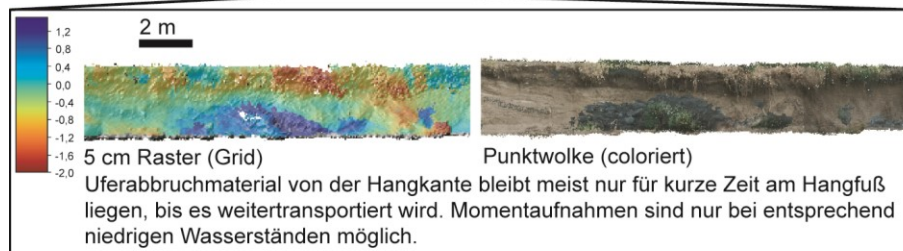
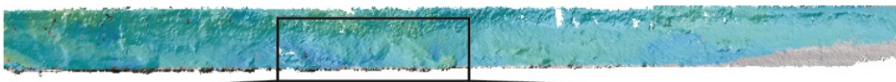
Abb. 6.2-41: Wasserstandsganglinie an der „1. Rückleitung-Prallhang“ mit eingezeichneten Zeitpunkten (gestrichelte Linie) der TLS-Aufnahmen.



23.01.2012 - 26.01.2012



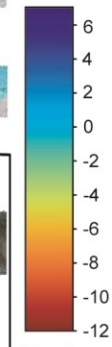
22.04.2013 - 19.06.2013



09.11.2010 - 19.06.2013



Akkumulation



Erosion

Abb. 6.2-42: Untersucher Bereich am Scanstandort „1. Rückleitung-Prallhang“ in Profilsicht (rot markiert, Foto: Peter Fischer 05.11.10) mit Veränderungen (Datengrundlage: TLS-Aufnahmen A bis Y, siehe Tab. 6.2-20 bzw.6.2.-21) (leicht verändert nach FISCHER und CYFFKA in press).

Die Auswertung zur Rückverlagerung über die 25 Zeitschritte zeigt, dass die anfangs erhöhten Erosionsraten im Laufe der Beobachtungsperiode immer weiter abnehmen (Abb. 6.2-43 und Abb. 6.2-44). Über drei Transekte, die den Anfang, die Mitte und das Ende am Prallhang repräsentieren, lassen sich bei der Betrachtung der Abbildung 6.2-43 Unterschiede bei der Rückverlagerung innerhalb des Prallhanges bei einzelnen Aufnahmen feststellen.

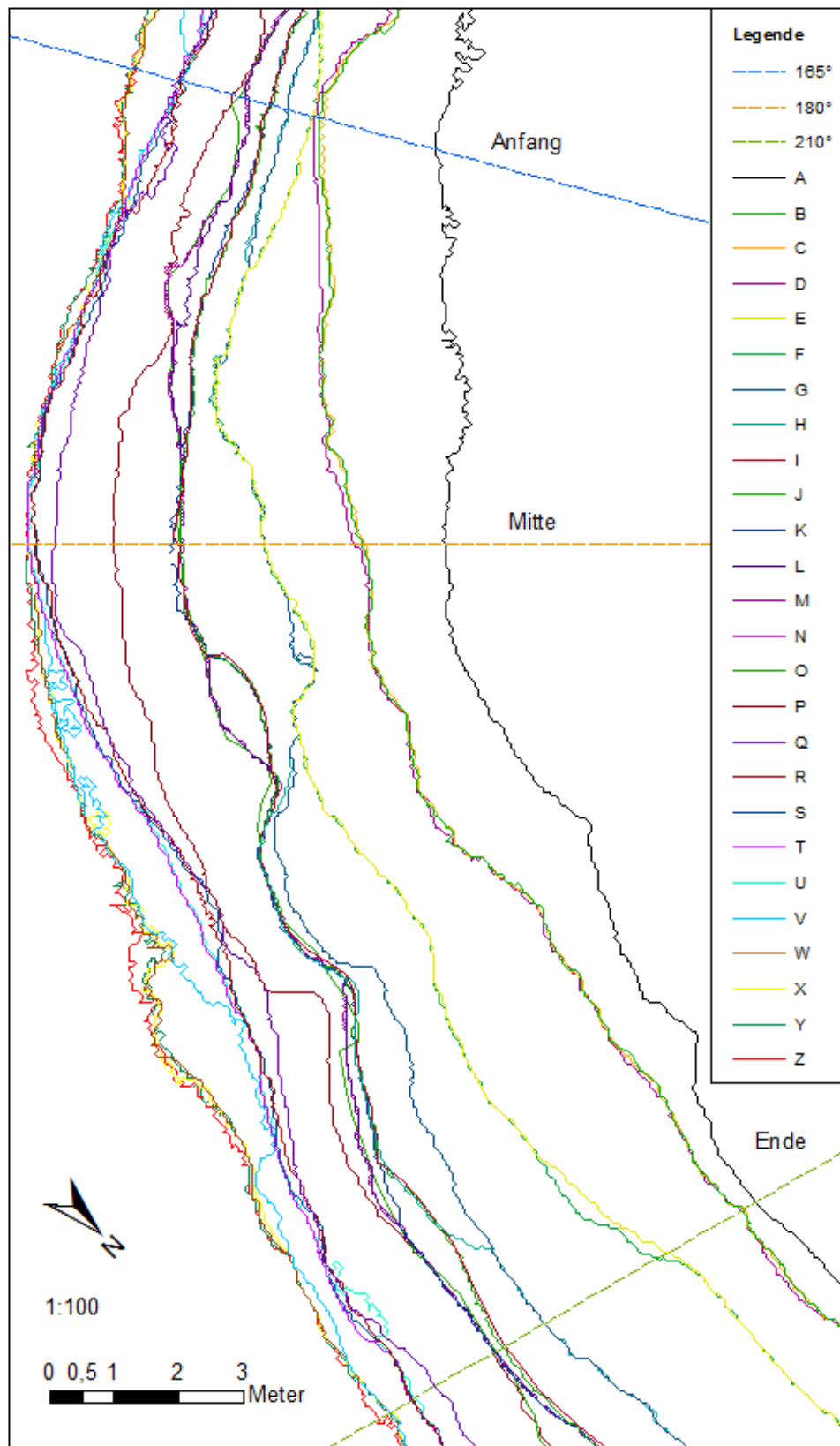


Abb. 6.2-43: Hangrückverlagerung an drei Transekten (165°,180°,210°, Erläuterungen siehe Text) an der „1. Rückleitung-Prallhang“.

Während mit 2,01 m das Maximum an Rückverlagerung am hinteren Ende (flussabwärts) des Prallhanges zwischen der Aufnahme F bis G gemessen werden konnte, war am Anfang des Prallhangs gleich bei der ersten Aufnahme die bisher deutlichste Rückverlagerung (1,86 m) zu messen. In der Mitte kam es immer wieder zu lateraler Erosion von über 1 Meter (Abb. 6.2-43 und 6.2-44). Durch verschiedene Versagensprozesse am Prallhang (siehe Kapitel 2.3.4) kam es immer wieder zwischen zwei Aufnahmen zu kleinen Hangzuwachsrate durch Verkipfung oder durch Zuwachs von Vegetation und Wurzelteilen oder zu keiner Veränderung (bedingt durch die Messmethodik und des gewählte Vorgehen beim Auswerteverfahren), die aber meist recht schnell bei den Folgeaufnahmen wieder der Erosion zum Opfer fallen (0-Werte in Tabelle in Abb. 6.2-44). Die monatliche Hangrückverlagerung würde demnach rund 0,40 m betragen. Die relativ hohen Werte zwischen 0,23 m (am Anfang) und 0,46 m (in der Mitte) sind vor dem Hintergrund des Aufnahmezeitpunktes zu betrachten. Hierzu wurde die Abb. 6.2-44 mit einer Tabelle ergänzt, die einige wesentliche Einflussfaktoren der jeweiligen Scanperiode berücksichtigt, diese sind:

- Anzahl der Hochwasserereignisse (HW)
- Anzahl der Ökologischen Flutungen (ÖF)
- Anzahl der Tage mit besonderen Abflussbedingungen (längere Zeit > 5m³/s Ausleitung) im Ottheinrichbach (OHB)
- Anzahl der Starkniederschläge über 30 mm (N)
- Anzahl der Umbaumaßnahmen (U)

Weiter wurde für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Scanaufnahmen die Hangrückverlagerung in cm/Tag umgerechnet und an dieser Stelle nochmal die Anzahl der Tage zwischen den Aufnahmen mit angegeben.

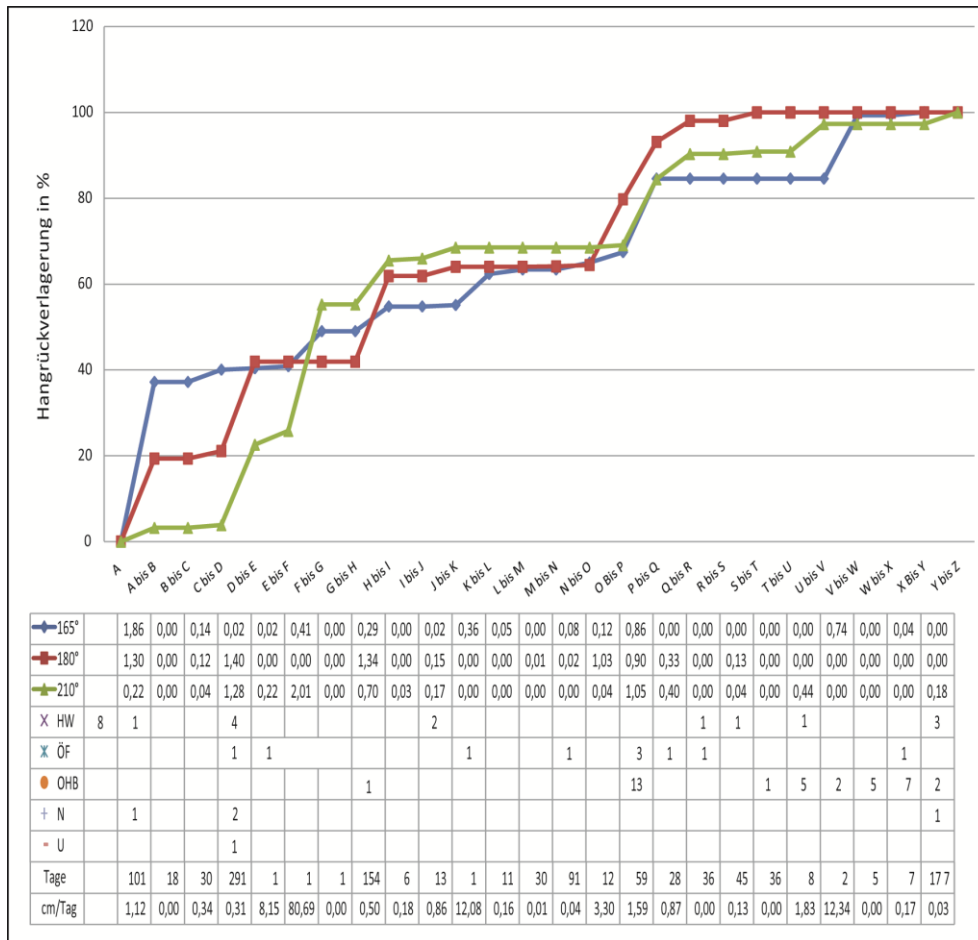


Abb. 6.2-44: Hangrückverlagerung an den drei Transekten aus Abb. 6.2-43, dargestellt in Prozent (Graphik) und in Meter (Tabelle) unter Beachtung wesentlicher Einflussfaktoren: (Hochwasserereignisse (HW), Ökologische Flutungen (ÖF), besondere Abflussbedingungen im OHB (OHB), Starkniederschläge über 30 mm (N) und Umbaumaßnahmen (U)). Sowie die Tage zwischen den Aufnahmen und der Hangrückverlagerung in cm/Tag.

Da der Krümmungsradius nach NANSON und HICKIN (1983 in SCHERLE 1999) bedeutsam für die Geschwindigkeit einer Laufverlagerung ist, wird für den Standort der „1. Rückleitung“ dieser Formparameter beispielhaft näher beschrieben. Während die erste Aufnahme noch deutlich von dem gestreckten Verlauf der Bauausführung gekennzeichnet ist (vgl. Gerade und großer bzw. kleiner Kreisbogen in Abb. 6.2-45), ist in der weiteren Entwicklung eine Erweiterung und Annäherung an einen idealisierten Kreisbogen zu erkennen (hellblauer Kreis in Abb. 6.2-45). Legt man einen solchen an die Uferlinie an, so lässt sich daraus der Mäanderradius berechnen (Kapitel 5.2.1). Für diesen manuell an die Laufkrümmung (hier an der Außenkurve gemessen) angepassten Kreis erhält man einen Radiuswert von 24,5 m. Über das Verhältnis vom Radius zur Gerinnebreite lassen sich Aussagen zur Ufererosion treffen (NANSON & HICKIN 1983). Nahe dem Wert 3 konnten die größten Ufererosionsraten festgestellt werden. Setzt man die aktuell erreichten Werte ein, ergibt sich inzwischen ein Quotient von 2,0, damit ist inzwischen wieder mit abnehmenden Erosionsraten zu rechnen. Insgesamt bleibt die Ausprägung der gekrümmten Form, insbesondere der letzten Aufnahmen, wenig veränderlich.

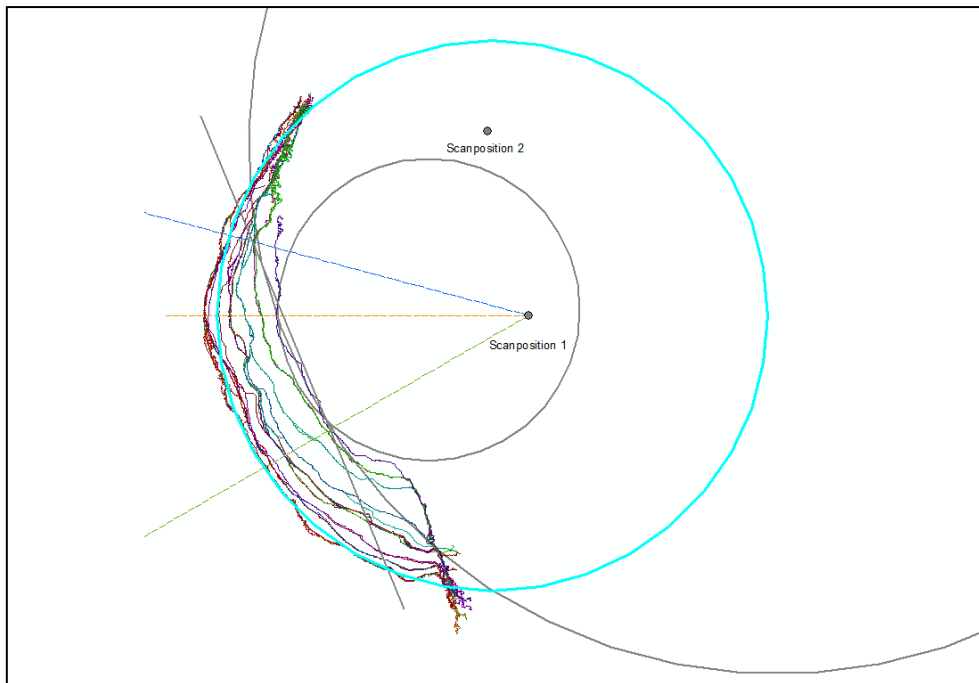


Abb. 6.2-45: Hangrückverlagerung an der „1. Rückleitung-Prallhang“ (Gesamtansicht der Abbildung 6.2-43) mit angelegten Kreisbögen (blauer Kreis hat einen Radius von 24,5 m).

An steilen und überhängenden Prallhängen spielen verschieden Faktoren und Prozesse zusammen, die Massenbewegung und Materialtransport bestimmen. Für sechs Aufnahmezeiträume wurden die Erosions- und Akkumulationsraten bei FISCHER und CYFFKA (in press) bestimmt (Tab. 6.2-21). Dabei bildet sich in der Variation der Fläche meist der Wasserstand zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt, selten der ausgewählte Scanbereich, ab.

Tab. 6.2-21: Erosion und Akkumulationsraten am Standort „1. Rückleitung-Prallhang“ (in fett Aufnahmezeitpunkte zur Abbildung 6.2-42, ergänzt aus FISCHER und CYFFKA (in press)).

Aufnahmezeiträume	Tage (zw. den Aufn.)	Erosion in m ³	Volumen in t	Akkumulation in m ³	Volumen in t	Fläche in m ²
A→C: 09.11.10 bis 08.03.11	119	55,9	86,1	12,4	19,1	80,0
C→E: 08.03.11 bis 23.01.12	321	75,5	116,3	0,3	0,5	65,2
E→H: 23.01.12 bis 26.01.12	3	111,7	172	0,3	0,5	70,4
H→T: 26.01.12 bis 22.04.13	452	207,1	318,9	0,0	0	84,0
T→Y: 22.04.13 bis 19.06.13	58	35,0	53,9	8,7	13,4	87,4
A→Y: 09.11.10 bis 19.06.13	953	481,4	741,4	0,2	0,3	68,2

Synthese:

In den etwas mehr als zweieinhalb Jahren fand am Prallhang „1. Rückleitung“ durch Krümmungserosion eine Rückverlegung des Ufers von über 12 m (Maximum) statt. Bezogen auf den untersuchten Abschnitt mit einer Fläche von 68,2 m² wurden rund 481,4 m³ erodiert (Abb. 6.2-42, Tabelle 6.2-21). Während es an diesem Standort besonders während ÖF (23.01.2012 bis 26.01.2012, ÖF 2) zu erhöhten Erosionserscheinungen durch die am Prallhang wirkenden Fließkräfte kommt, tragen auch andere (gravitative) Prozesse infolge von Austrocknung oder Starkregenereignisse etc. zur Morphodynamik und Massenbewegungen bei.

6.2.4.2.8. „1. Rückleitung-Fließgewässerstrecke“

Die im Kapitel 5.2.4.3 als 4. Methode vorgestellte Möglichkeit, TLS-Daten auszuwerten, wurde in leichter Abwandlung für den Fließgewässerabschnitt (Teilabschnitt 4.1, Abb. 4-23 bzw. 6.2-43) vorgenommen. Das 0,05 m Grid (Abb. 6.2-46, oben rechts) wurde herangezogen um die Veränderung der Uferlinie und die Entwicklung und Veränderung von Strukturelementen zu detektieren.

Abbildung 6.2-46 zeigt die Veränderung zwischen den drei Aufnahmezeitpunkten K (13.06.2012), N (15.07.2012) und T (22.04.2013) (vgl. Tab. 6.2-20).

Während im ersten Aufnahmezeitraum von 42 Tagen der Verlauf der Uferlinie nur geringe Veränderungen erfährt und wasserstandsbedingt sogar eine Abnahme der Breite angedeutet wird, ist bis zur Aufnahme T, also in 271 Tagen, eine deutliche Verbreiterung festzustellen. Diese Flussbettauflerung mit Ufererosion lässt sich auf beiden Seiten über die komplette Fließgewässerstrecke von 220 m nachweisen. Die Uferlängsgliederung ist durch sich entwickelnde Uferbuchten und dem Wechsel von Prall- und Gleitufer geprägt.

Auch bei der Betrachtung der Strukturelemente, wie Kiesinseln und Kiesbänke sowie diversen Totholzstrukturen (meist Wurzelstöcke), sind massive Veränderungen zu beobachten. Im Folgenden soll sich nur auf die größeren, infolge der Breitenerosion entstandenen Kiesinseln und Kies- und Sandbänke bezogen werden (Abb. 6.2-46). Alle Formen sind eigendynamisch entstanden und wurden nicht angelegt, die großen Ablagerungsbereiche lassen sich auch im Luftbild (Abb. 6.2-46, oben links) gut erkennen.

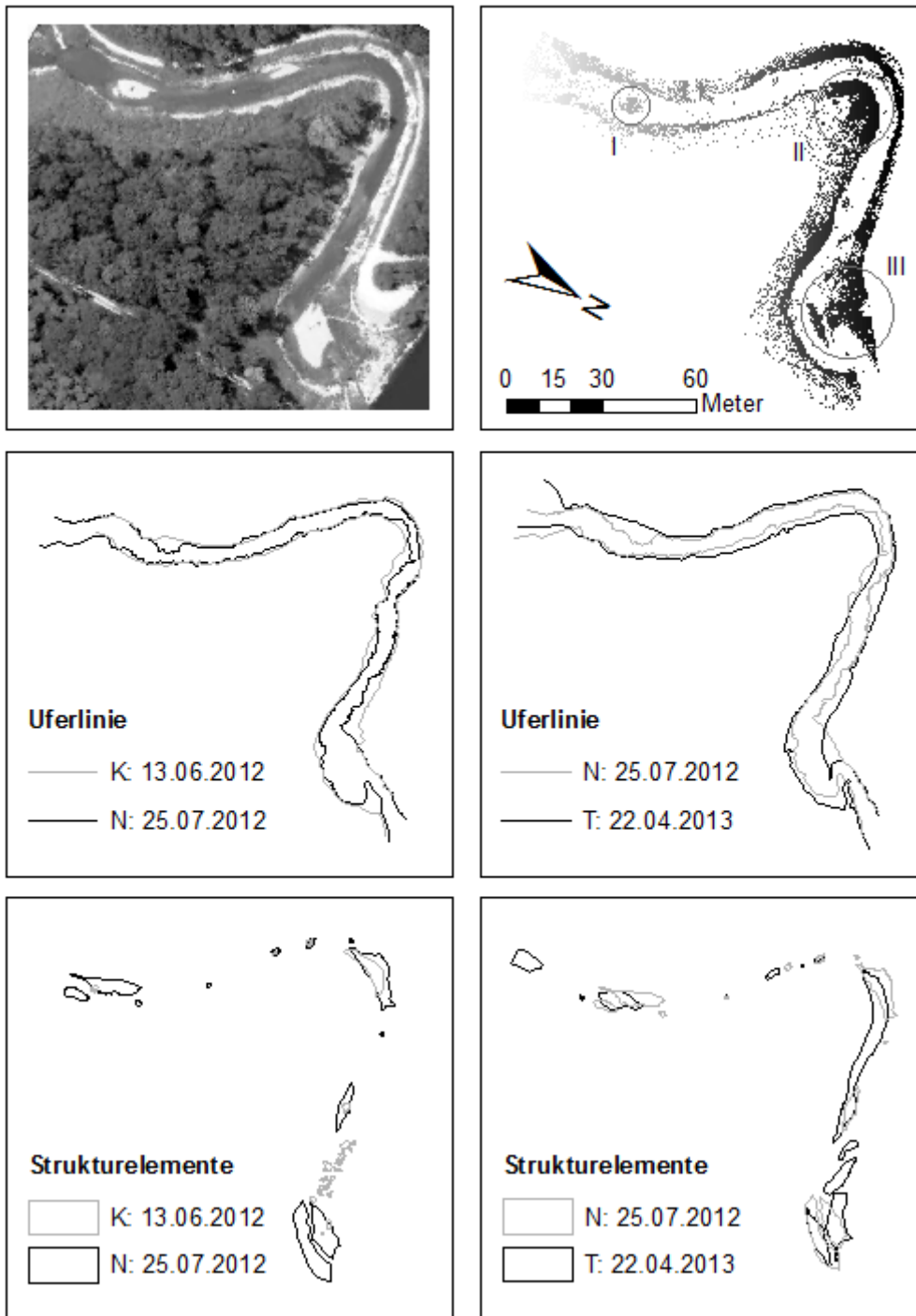


Abb. 6.2-46: Eigendynamische Laufentwicklung an der Fließgewässerstrecke an der „1. Rückleitung“. Datengrundlage: TLS-Aufnahmen, Luftbild: LDBV 2013.

Bei der Betrachtung der Strukturelemente sind besonders drei Bereiche (Abb. 6.2-46 oben, rechts mit Kreisen markiert) hervorzuheben:

I: die Kiesinsel kurz nach der „Nasenbrücke“: Hier ist die ungewöhnliche Materialzusammensetzung auffällig, da diese im Wesentlichen aus Flussbausteinen, die im Zuge der Baumaßnahmen eingebracht worden sind, besteht. Die Sortierung des Materials reicht von größeren Steinen am Kiesinselkopf bis zu Grobkies am Ende der Insel. Nach der

Entstehung einer Mittenbank entwickelte sich daraus eine Diamantbank nach KELLERHALS (1967 in SCHERLE 1999). Die Erstbesiedlung mit Vegetation erfolgte im Sommer 2012. Inzwischen kann die Struktur als Kiesinsel angesprochen werden, da auch nach ÖF und dem Juni-Hochwasser die Vegetation weiterhin stabilisierend wirkt und das vertikale Wachstum unterstützt.

II: die Kies- und Sanduferbank (Krümmungsbank) in der 65-Grad-Innenkurve (lange Form, die sich zwischen der N-ten und T-ten Aufnahme ausgebildet hat): Hier konnte in Fließrichtung über die Entwicklungszeit eine deutliche Materialsortierung beobachtet werden. Die zunächst aus reinem Kies aufgebaute Uferbank, direkt an der Flussinnenkurve (vgl. Abb. 4-24, links) wurde allmählich mit feinerem Material überdeckt und in ihrer Längsausdehnung deutlich erweitert, im Sinne einer klassischen Gleithang (point bar) Bildung.

III: die breite Kiesuferbank kurz vor der Mündung in die Donau: Sie baut sich aus den Sedimenten der untersuchten Fließstrecke auf und bildet das Gleitufer zum gegenüberliegenden Prallhang (Abb. 6.2-43). Durch kontinuierliche Auflandung in der Innenkurve baute sich eine bis zu 60 cm mächtige Bank auf (Abb. 4-23, im Vordergrund), die der zurückweichenden Uferlinie am Prallhang folgt und ständig verbreitert wird. Bei höheren Abflüssen kommt es temporär zu einem Überfließen der Struktur und einer Teilung, die sich auch in der Abbildung 6.2-46 nachvollziehen lässt.

6.2.5 Fallbeispiel: UAV-Befliegung (Teil B)

Besonders um für größere Bereiche Höhenmodelle zu erstellen, ist ein Methodenwechsel möglich. Zur Ergänzung der TLS-Messungen wurden, wie im Kapitel 5.2.4.4 beschrieben, auch Luftaufnahmen mit einem UAV durchgeführt. Eine Befliegung an der „Wegekreuzung“ erfolgte während der Niedrigwassertestphase 2014. Unter solch günstigen Bedingungen (niedriger Wasserstand in Kombination mit klarem Wasser) ist sogar die Gewässersohle sichtbar, wie bei der Gewässerstrukturkartierung im Kapitel 6.2.2.2 bereits gezeigt wurde (Abb. 6.2-7). Für das Fallbeispiel wurde aus den Daten ein DGM berechnet (Abb. 6.2-47). Im Gegensatz zum TLS werden auch Wasserflächen bzw. mit gewissen Einschränkungen auch Unterwasserflächen als Information mit aufgenommen. Im DGM werden damit auch für die Bereiche unter Wasser Höhenwerte angegeben, die nach erster Prüfung den tatsächlichen Sohlhöhen in grober Annäherung entsprechen. Weitere Analysen wie bei den TLS-Daten können bei Folgeaufnahmen durchgeführt werden oder mit diesen kombiniert werden.

Bei Flügen während ÖF sinkt wie beim TLS die Anzahl der zu verwertenden Datenpunkte auf ein Minimum. Werden die von Vegetation bestandenen Flächen entfernt, bleiben nur kleine Uferbereiche zur weiteren Bearbeitung und Analyse übrig. Hier kann „nur“ eine Auswertung des Wasserstandes und der Überflutungsflächen erfolgen, wie Abbildung 6.2-48 zeigt. Allerdings lassen sich so auch große Flächen schnell und detailgetreu aufnehmen, solange sie zu befliegen sind. Der Großteil der Überflutungsflächen wurde, wie bereits erwähnt, über klassische Kartierung erfasst.

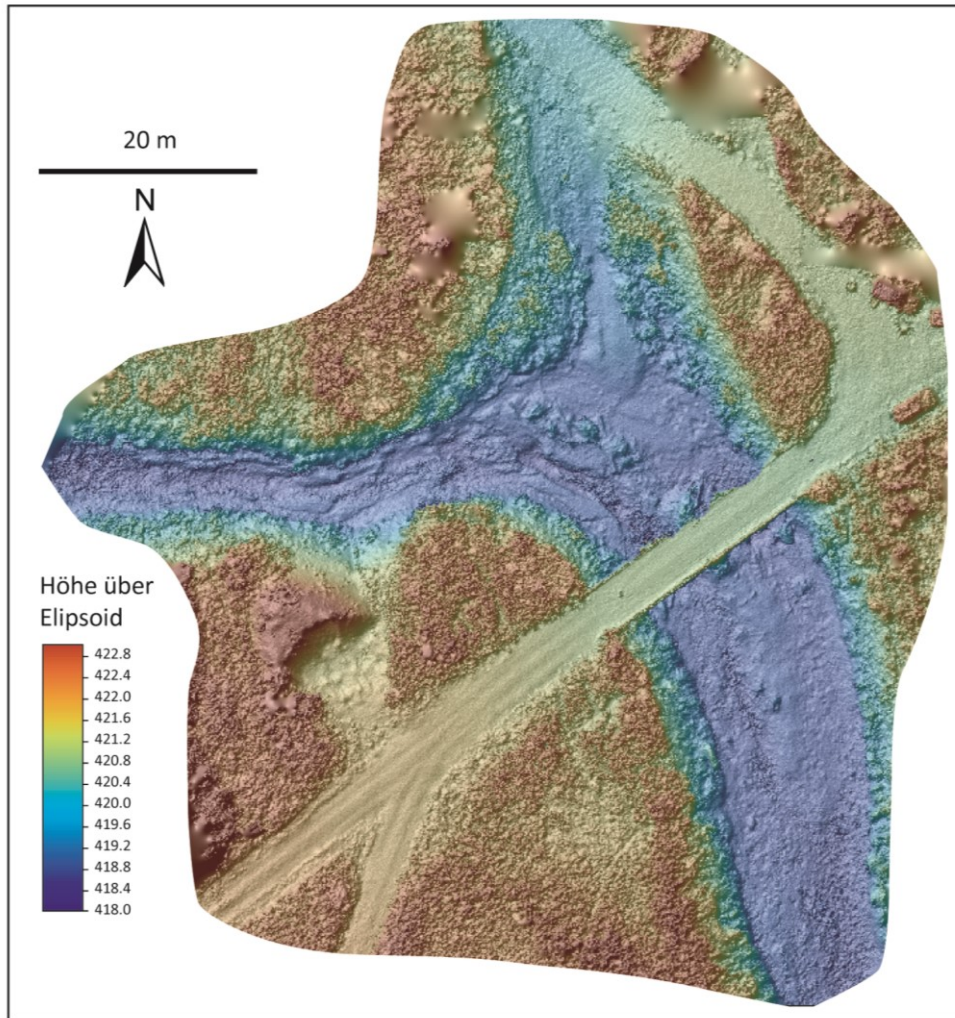


Abb. 6.2-47: Höhenmodell aus UAV-Befliegung für den Bereich der „Wegekreuzung“.



Abb. 6.2-48: Orthophoto aus UAV-Befliegung für den Bereich der „Wegekreuzung“ zur ÖF am 14.06.2012.

6.2.6 Zusammenfassung

Zur Erfassung der sich über verschiedene Maßstabsebenen erstreckenden morphologischen Veränderungen (Umlagerungsprozesse im Gewässerbett und eigendynamische Laufverlagerung) wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden eingesetzt.

Bereits während der Baumaßnahmen wurde begonnen, das naturnah gestaltete Gerinne zu scannen, um so ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell zu generieren, von dem aus weitere Analysen durchgeführt werden konnten und welches auch für künftige Arbeiten als wertvoller Grundlagendatensatz angesehen werden kann.

Der **Gewässergrundriss** sowie andere Bezugsgrößen zeigen stellenweise eine Abweichung von einer natürlichen Form. Im Verlauf des Ottheinrichbaches lässt sich eine Trennung in Neubaustrecke und alte Flussstrecke treffen. Diese Teilung kann auch durch die Sinuosität, den Windungsgrad, in einer Maßzahl ausgedrückt werden. Demnach ist der erste Fließgewässerabschnitt der gestreckten, der zweite den mäandrierenden Flussläufen zuzuordnen. Eine Veränderung der Linienführung benötigt viel Zeit, da sie das Resultat eines vielfältigen und komplexen morphodynamischen Entwicklungsprozesses ist. Für das neu angelegte Umgehungsgewässer wurden allerdings alte Flussläufe verwendet, in denen entsprechende Umlagerungsprozesse ablaufen, die eigentlich – bei natürlichen Flüssen – erst zur Ausbildung der Laufentwicklung führen.

Umlagerungsprozesse, die den ganzen Abschnitt der Neubaustrecke betreffen, wurden durch die Kartierung der **Gewässerstrukturelemente** erfasst. Damit konnte einerseits eine Differenzierung und andererseits eine Entwicklung von neuen Habitaten festgestellt werden. Totholzelemente haben sich dabei als wesentlicher Strukturbildner herausgestellt. Alle eingesetzten Elemente haben ihre Position verändert.

Manche Totholzansammlungen führen zur Ausbildung von Kolken (Pools) und verändern die Tiefenvariabilität im Längsprofil der Gewässersohle. Über verschiedene Kartierungen wurde die Abfolge von **Riffle-Pool-Strukturen** erfasst und mit Angaben aus der Literatur verglichen. Dabei zeigt sich, dass entweder mehr als doppelt so viele Riffle-Pool-Abfolgen auftreten sollten als bei den Kartierungen aufgenommen wurden, oder dass in viel zu kurzen Abständen Sohlunebenheiten auftreten. Auch wenn sich durch verschiedene Verfahren und Kartierungsmethoden Abweichungen von der 5- bis 7-fachen Gerinnebreite ergeben, deuten weitere Indizien aus der Querprofilvermessung darauf hin, dass es sich um methodenunabhängige, tatsächliche Abweichungen vom theoretisch-natürlichen Abstand handelt.

Die Auswertungen der **Querprofilvermessung** zeigen eine sehr unterschiedliche „Entwicklungsfreudigkeit“ an den einzelnen Standorten. Das Flussbett unterliegt infolge dynamisierter Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten einer ständigen Veränderung. Nicht überall reichen die Schubspannungskräfte aus, um an der Flusssohle und den Uferbereichen die Gerinnegeometrie tiefgreifend zu verändern; so bleiben die Profile weitgehend stabil. Über das Breiten-Tiefen-Verhältnis und seine Veränderung kann der Schluss gezogen werden, dass durchschnittlich eine Eintiefung der Querprofile stattfindet, wohingegen die

tiefsten Stellen sukzessive aufgefüllt werden. Alle untersuchten Querprofile sind mit einem Breite-Tiefen-Verhältnis größer 3:1 als naturnah einzustufen. Neben der Breiten- ist auch die Tiefenvariabilität sowohl in den einzelnen Querprofilen als auch im gesamten untersuchten Abschnitt sehr hoch, was sich auch am stark variierenden Strömungsbild ablesen lässt. Nicht immer folgt einer Breitenveränderung (Aufweitung) auch eine Veränderung in der Tiefe, d.h. auch bei großen Tiefen können sehr breite Stellen vorkommen.

Der Vergleich weiterer Verhältnisse, insbesondere des Eintiefungsverhältnisses, lässt Aussagen über die Variabilität der Wasserflächen und der potentiellen Ausuferungskapazität zu. Schön zu sehen ist das am bereits bekannten QP 25 mit dem kleinsten Wert von 0,35 m, also einer sehr schnell ausufernden Stelle.

Die über die Veränderung der Gerinnegeometrie deutlich gewordene Dynamik spiegelt sich auch in der Auswertung der Erosions- und Akkumulationsflächen (2D-Aufsicht-Betrachtung) wider. Die Fläche, die im Mittel an einem Profil erodiert wird, beträgt $3,6 \text{ m}^2$, während die Akkumulationsfläche nur $1,3 \text{ m}^2$ ausmacht. Der Eindruck, dass nicht immer kleine mittlere Tiefen große Gerinnebreiten bedingen, und umgekehrt große Tiefen nicht immer kleine Breiten nach sich ziehen, konnte bestätigt werden. Ein entsprechend großer Zusammenhang zwischen einzelnen morphometrischen und hydraulischen Variablen lässt sich nach den Erfahrungen aus der „hydraulischen Geometrie“ bestätigen.

Zusammenfassend können aus den Detailbetrachtungen der Aufnahmen mit einem **terrestrischen Laserscanner** verschiedene Einzelprozesse herausgefiltert werden. An sechs untersuchten Standorten können aufgrund weiterer Einflussfaktoren (Vegetation, Substratzusammensetzung etc.) verschiedene Prozesse beobachtet werden.

Über viele Aufnahmen hinweg ist am ersten Standort eine Erosionslinie an den Ufern zu erkennen, die direkt mit den Abflussverhältnissen in Verbindung gebracht werden kann. Bemerkenswert ist zudem die extrem schnelle Entwicklung von diversen Bankstrukturen. Während des ersten Monats konnte eine Setzung des Materials (Kiese und Sande), welches während der Bauphase umgelagert worden ist, detektiert werden. Ein natürlicher Sedimenteintrag von den noch instabilen Ufern wurde durch die Erosionsrinne und die Hangrutschung festgestellt. Im weiteren Verlauf konnte nur noch eine deutlich reduzierte morphologische Aktivität gemessen werden, die auch durch ÖF nicht mehr wesentlich gesteigert wurde.

Am zweiten Standort kam es schon vor der Wassereinleitung zu Abbrüchen an einer naturnah angelegten Prallhangsituation. Schnell wurde das heruntergefallene Material mit der ersten „Welle“ abtransportiert und eine weitere Hangunterschneidung durch Strömungs-erosion führte zur Ausbildung eines Überhanges und einer Hohlkehle über dem mittleren Wasserspiegel. Diese Erosionszonen haben sich im Beobachtungszeitraum sukzessive weiterentwickelt und vergrößert. Maßgeblich an diesem Geschehen beteiligt waren hier die ersten ÖF. Auch in der weiteren Beobachtung blieb dieser Standort morphologisch aktiv.

Eine kontinuierlich wachsende Akkumulationsform in Gestalt einer Zunge wurde am dritten Standort untersucht. Im Laufe mehrerer ÖF bildete sich eine Sedimentzunge, die von einem Nebengerinne in das Hauptgerinne des OHB geschüttet wurde. In der Entwicklung war ein Wachstum und ein Vorstoß in Richtung Gerinnemitte von 6,5 m zu messen. Der Breitenzuwachs betrug etwa 3 m. Solange Sediment aus der Furt nachgeliefert werden konnte, blieb der Wachstumstrend erhalten. Danach konnte nur noch eine deutlich reduzierte Aktivität und Weiterentwicklung gemessen werden. Da weder weiteres Material aus der Flutmulde kommen noch aus der Gerinnesohle gelöst werden kann, scheint ein Klimaxstadium erreicht zu sein. Die Ausbildung der Form ist weitgehend abgeschlossen und Veränderungen sind jetzt nur noch kleinräumig und im cm-Bereich zu detektieren.

Der im Auenlehm ausgebildete Prallhang (Standort 4) ist im Vergleich zum Prallhang an der „Radwegbrücke“ (Standort 2) eher erosionsresistent und wird zusätzlich noch durch Vegetation stabilisiert. Selbst nach acht Flutungen konnte insgesamt nur eine maximale Rückverlagerung des Ufers von 50 cm gemessen werden. Über die Rohdaten der Aufnahmen war eine deutliche Erosionsrinne (Hohlkehle) im Bereich um die Mittelwasserlinie feststellbar.

Wie am Standort 2 kam es auch am Standort 5 schon vor der Wassereinleitung zu Abbrüchen an der künstlich geschaffenen, mit senkrechten Uferwänden ausgestatteten Engstelle. An den strömungsausgesetzten Stellen erfolgte schnell eine Bildung von Hohlkehlen. Diese Erosionszonen haben sich im Beobachtungszeitraum weiter entwickelt, zusammengeschlossen und vergrößert. Eine Erweiterung kann sowohl in als auch gegen die Fließrichtung erfolgen. Verantwortlich dafür waren hier allerdings nicht die ÖF, sondern die bettbildenden Abflüsse im OHB. Die erste ÖF und die mit ihr einhergehenden erhöhten Fließgeschwindigkeiten und veränderten Strömungsrichtungen erfolgten erst nach über 120 Tagen, in denen „normale Abflüsse“ wirksam waren. Zu diesem Zeitpunkt war die „aktive“ Phase morphologischer Veränderung bereits abgeschlossen.

In den etwas mehr als zweieinhalb Jahren fand am Prallhang „1. Rückleitung“, dem letzten Standort, durch Krümmungserosion eine Rückverlegung des Ufers von über 12 m statt (Maximum). Während es an diesem Standort besonders bei ÖF zu erhöhten Erosionserscheinungen durch die am Prallhang wirkenden Fließkräfte kommt, tragen auch andere (gravitative) Prozesse durch Austrocknung oder Starkregenereignisse etc. zur Morphodynamik und Massenbewegungen bei.

Gerade (nur) die Detailbetrachtung an den Standorten und die kleinräumige raum-zeitliche Dynamik in den Oberflächenveränderungen am jeweiligen Standort selbst zeigt das Zusammenwirken unterschiedlichster Faktoren, die sich in der meist nur über kurze Zeitspannen beständigen Form bzw. Oberflächenstruktur widerspiegeln. Hierüber können die rezentmorphodynamischen Prozesse erkannt und beleuchtet werden.

7. DISKUSSION

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Betrachtungen und Themenfelder orientiert sich die Diskussion der Ergebnisse zunächst an der in der Arbeit bereits verwendeten Gliederung, es wird eine Trennung in hydrologische und morphologische Prozesse vorgenommen. Dennoch soll aber über Querverweise die Wechselwirkung der stark verwobenen und ineinander übergehenden Prozesse herausgestellt werden. Nachfolgend sollen die eigenen Ergebnisse mit den im Kapitel 1.3 aufgeworfenen Hypothesen und den Erläuterungen in Verbindung gebracht und mit in Kapitel 2 vorgestellten Theorien zum fluvialen System und der Flussmorphologie (Gerinnegrundriss, Gerinnebildung, Ufer- und Seitenerosion, Sohlstrukturen) und Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen verglichen werden.

7.1 Hydrologisches Verhalten

7.1.1 Wasserstand und Abfluss von Donau und Ottheinrichbach

Viele Studien beschäftigten sich bisher mit den Wirkungszusammenhängen von erhöhten Abflüssen – insbesondere von Hochwasserabflüssen – und den resultierenden morphologischen Prozessen in Fließgewässern. Aufgrund der hohen Komplexität und der Wechselwirkungen zwischen unabhängigen und abhängigen Variablen (Steuer- und Zielgrößen) bleibt eine Abschätzung oder Modellierung der ursächlichen Auslösefaktoren schwierig.

Die häufig diskutierten Faktoren sind Größe und Wiederkehrintervall des Hochwassers, Strömungsenergie, Gerinnegeometrie, Anteil und Menge der transportierten Feststoffe, Vegetation und Totholz, sowie Verbauungen und andere anthropogene Faktoren (WOLMAN & MILLER 1960, MILLER 1990, EATON & LAPOINTE 2001, WOHL 2008, TAKAHASHI et al. 2008, GALIA & HRADECKÝ 2011, THOMPSON & CROKE 2013, GROVE et al. 2013, KLÖSCH et al. 2015).

Auswertungen der Wasserstands- und Durchflussreihen der Donau zeigen, wie hydrologisch unterschiedlich einzelne Jahre bezogen auf den Gesamtzeitraum sein können und auch wie innerhalb der letzten fünf Jahre Schwankungen der Abflussmenge (Donau, Ottheinrichbach, Zeller Kanal) die hydrologischen Verhältnisse im Auwald gesteuert haben. Durch den Abfluss als wesentliche Steuergröße und seine Variabilität ist die Rahmenbedingung für die eigendynamische gewässermorphologische Entwicklung gegeben. Die Analyse der Hochwasserereignisse zeigt, dass die Dauer der relevanten Hochwasserereignisse bei 6,4 Tagen liegt und dass das HQ_1 einem Abfluss von $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht.

Verschiedene Studien kommen zum Schluss, dass das Wiederkehrintervall von großer Bedeutung ist und dass ein FG nur bei großen Hochwassern und anderen seltenen Ereignissen geomorphologisch aktiv ist (HARVEY 1984, CENDERELLI & WOHL 2003, WOHL 2008). KALE und HIRE (2004) kommen durch monsunbeeinflusste Ereignisse (bei nicht verfestigtem Material und spärlicher Vegetation) zu dem Schluss, dass ein beim letzten Hochwasser veränderter Abschnitt bei einem darauffolgenden Hochwasser, trotz ähnlichen Ausmaßes, nicht weitere oder nur sehr reduzierte Veränderungen erfährt (vgl. WOHL 2008).

Diese Ergebnisse können bei einem naturnah angelegten FG – zumindest in der ersten Beobachtungsphase – nicht bestätigt werden. Hier führen auch bereits geringere Abflüsse und kurz hintereinander liegende Flutungen zu den gezeigten Veränderungen und morphodynamischen Prozessen.

Nach SCHERLE (1999) sollte es Ziel der Planung sein, die Steuerung von Anlagen, wie bspw. Ausleitungsbauwerke, so zu regeln, dass zumindest Hochwasserabflüsse, die dem MHQ entsprechen, die Anlagen wenig gedämpft passieren können. Damit wäre nach SCHERLE (1999) eine noch weitgehende natürliche Dynamik zumindest im bettbildenden Bereich gewährleistet. Gleichzeitig betont er, dass diese Abflussdynamik nicht für den aufzubildenden Bereich ausreicht. Wie die Ergebnisse zeigen, wird bereits ab einem HQ_1 ($1.000 \text{ m}^3/\text{s}$) kein Wasser mehr in die Aue geleitet (erst ab ca. $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ wieder, was allerdings nur alle paar Jahre passiert). Der MHQ des OHB kann mit $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen werden, wenn die Abflüsse während ÖF außer Acht gelassen werden. Es wurde eine geringe Abflussdynamik sowohl für die Donau als auch den OHB mit verschiedenen Bezugsgrößen attestiert.

Auch bei den Überschreitungstagen, etwa während eines halbjährlichen Hochwassers, ergeben sich mit aktualisierten Datenreihen Unterschiede. Demnach kommt es zu einer Reduzierung von 9 Tagen (MARGRAF 2004) auf aktuell nur noch 5 Tage, an denen ein Durchfluss von $800 \text{ m}^3/\text{s}$ überschritten wird. Die Diskrepanz der Anzahl von Hochwasserereignissen und ÖF wurde bereits angesprochen (siehe Kapitel 5.1.1.1) und soll hier nicht noch einmal aufgegriffen werden.

In diesem Zusammenhang ergeben sich auch ganz grundsätzliche Fragen zur Steuerung der Durchflussmengen des OHB. Eine Orientierung am Durchfluss des Vorfluters Donau bringt gewisse Einschränkungen mit sich, die hier Erwähnung finden sollen. Insbesondere die Schwankungen im Bereich der halb- oder vierteljährlichen Ereignisse (mittleres Hoch- und Niedrigwasser) in der Donau wird deutlich durch die Steuerung des Kopfspeichers des Lechs, des Forggensees, beeinflusst. Nach dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (LFW 1984) ist der Lech ein „Hybridgewässer, besiedelt von Ubiquisten“. Am Pegel Landsberg ist im Durchschnitt an 150 Tagen im Jahr der Abfluss durch Wasserrückhalt niedriger, während er an den restlichen Tagen durch Wasserzugabe höher ist (LFW 1984). Nicht nur die großen Abflussspitzen werden gekappt (vgl. KALUSA 2007, HELLWEG 2009), auch kleinere Schwankungen werden möglichst nivelliert, um für verschiedene Belange ausgeglichene Abflüsse zu erhalten und die Nutzung der Wasserkraft zu optimieren.

Wenn man aus Naturschutzgründen ein naturnahes FG schafft, das über möglichst dynamische Abflüsse verfügen soll, darf es sich nur so weit wie zwingend notwendig an den für die Wasserkraft optimierten Abflüssen orientieren. Vielmehr wäre ein an anderen Parametern wie Niederschlägen oder Abflüssen von ungesteuerten Flüssen im Einzugsgebiet oder ein nach ökologischen Erfordernissen ausgerichtetes Abflussmanagement wünschenswert. An einem Umgehungsgewässer des Rheins wird eine monatlich gestaffelte Dotierung zwischen $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und $16 \text{ m}^3/\text{s}$ umgesetzt, die sich am mittleren monatlichen Rheinabfluss (MQ $1035 \text{ m}^3/\text{s}$) orientiert (GEBLER & LEHMANN 2013), auch feste Dotationsmengen ohne Adaption an unterschiedliche Abflussmengen werden umgesetzt.

JUNGWIRTH et al. (1998 in KAUFMANN 2012) schreiben als allgemeine Angabe von mindestens 2 % bis 5% Abfluss bezogen auf die Abflussmenge im Fluss. Beim OHB kann von etwa 1% für die Staffelung der Ausleitungsmengen ausgegangen werden. Da die durchschnittliche Ausleitungsmenge unter $3 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt, sind es für den Mittelwert unter 1 % des Donaudurchflusses. Dass dieser Mindestabfluss (von ca. 1 %) bei der Staustufe Vohburg als ausreichend erachtet wurde, lässt sich nur aus wasserwirtschaftlicher (SCHLEGEL 2000C) oder ökonomischer Sichtweise (MATTHES 1995) erklären. Eine Verbesserung – in Richtung Dynamisierung – wurde über eine erste Anpassung der Ausleitungsmengen erzielt (Tab. 4-5). So werden mittlerweile bei einem Donauabfluss zwischen $100 \text{ m}^3/\text{s}$ und $300 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht gleichbleibend $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgeleitet, sondern es erfolgt eine weitere Differenzierung der Dotationsmengen. Weitere Optimierungsmöglichkeiten sind nach Ansicht des Verfassers bereits in der Tab. 4-5 angegeben worden. Auch, ob die von SCHLEGEL (2000C) als massive Eingriffe im Auwald bezeichneten Veränderungen bei Ausleitungsmengen von 6 bis $12 \text{ m}^3/\text{s}$ in das aktuelle Gerinnebett tatsächlich nötig werden würden, bleibt nach bisherigen Erfahrungen fraglich. In diesem Zusammenhang ist zu bedenken, dass der OHB ein zweistufiges maximales Abflussniveau besitzt. Eines bei maximaler Dotation ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) und eines bei ÖF mit etwas unter $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Während bei natürlichen FG auch nach bordvollen Abflussbedingungen der Durchfluss weiter steigen kann, ist er im OHB bei gesteuerten Verhältnissen auch bei ÖF begrenzt – es fehlt Wasser, um bei vorgegebenem Querschnitt über die Ufer zu treten.

Neben den hohen, morphologisch wirksamen Abflüssen, spielen auch Niedrigwasserphasen eine für das Auensystem entscheidende Rolle. Dem „vielen Wasser“ bei einer ÖF stehen die niedrigen Abflüsse mit „wenig Wasser“ in Niedrigwasserzeiten gegenüber. Diese werden während Niedrigwasserzeiten der Donau, in Kombination mit dem Einsetzen der Dammbalken an den Bauwerken B 6 („Inselbrücke“) und B 8 („Mündungsbrücke“) (Abb. 4-17), über die Maßnahme der Grundwasserabsenkung zusätzlich verstärkt. Aber auch die niedrigen Ausleitungsmengen im OHB (ohne verstärkende GWA) sind für den Wechsel zwischen aquatischen und terrestrischen Standorten wichtig und für die Dynamik der Wasserstände entscheidend. Am Gießgang (Kraftwerk Greifenstein, Österreich) bspw. erfolgt zwischen den Monaten Oktober und Dezember eine gezielte, gesteuerte Wasserstandsabsenkung um Niedrigwasserphasen zu erzeugen (WASSERMANN 1999, VERBUND AHP 2001). Unbestritten ist, dass das teilweise Trockenfallen von Gewässern ein autotypisches Element ist (DISTER 1991, NUA 2000, MEYER 2008, SCHOLZ et al. 2005). Ökologisch entscheidend ist nach SOMMERHÄUSER (2005) die Vorhersagbarkeit der Trockenphase. Nur wenn diese mit einer zyklischen Regelmäßigkeit auftritt, können Anpassungsstrategien entwickelt werden und sich damit flexible Arten und Spezialisten in den extrem dynamischen Lebensräumen etablieren (WILLIAMS 2006, MEYER 2008).

Erst wenn eine minimale Dotationsmenge kleiner $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ umgesetzt wird, fallen mehrere Flächen trocken und Kies- und Schlammflächen tauchen vereinzelt im Fließgewässer auf (besonders wirksam an nur wenig über dem Mittelwasserspiegel liegenden Bereichen, wie „südlich des Albenschüttweihers“)

Bei steilen Uferböschungen (größer als 1:3), wie sie natürlicherweise zum Beispiel bei den Stufen der Auenterrassen vorkommen oder stellenweise anthropogen durch die Anlage der Gerinnegeometrie des OHB entstanden sind, führen Wasserstandsschwankungen (vor allem Oberflächenwasser, aber auch Grund- bzw. Qualmwasser) zu wenig Veränderung in der benetzten Fläche (Abb. 7-1, unten). Bei geringen Neigungen und Reliefunterschieden (Abb. 7-1, oben), wie sie häufiger in Auen anzutreffen sind, haben auch kleine Änderungen eine große Wirkung. Bereits eine geringe Einschränkung der Schwankung kann bei den typischen Flachwasserzonen in Auengewässern zu erheblichen Verlusten der Wasserwechselzonen führen und auch die Schlammlingsfluren beeinträchtigen. FOECKLER et al. (2010) sprechen von einem exponentiell zunehmenden Verlust an Flächen, je geringer die Uferneigung ist. Bereits im „Ökologischen Gutachten“ (HERRMANN 2001) wurde auf eine mehr oder weniger breite Wasserwechselzone auf höherem Niveau hingewiesen – hier in Verbindung mit ansteigenden Grundwasserständen. Ähnliches gilt auch für die neu entstandenen Bereiche entlang des OHB, die durch wechselnde Wasserstände geprägt sind. Diese in der Sekundäraue, also im teils vom Menschen angelegten, teils eigendynamisch entwickelten Gewässerbett des OHB entstehenden Flächen liegen auf niedrigerem Niveau, unterhalb der Donauaue.

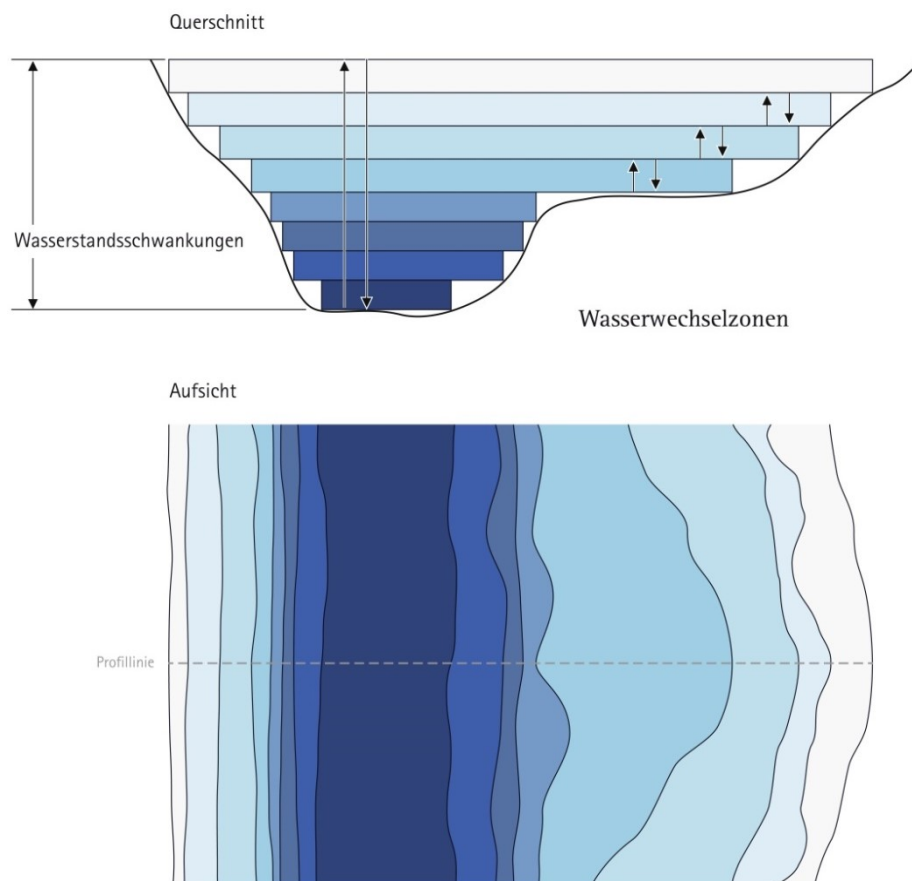


Abb. 7-1: Schematische Darstellung der Auswirkungen von Schwankungen in den Wasserständen im Ottheinrichbach. Die Amplituden (senkrechte Pfeile im Querschnitt) haben direkten Einfluss auf die Größe der benetzten Flächen am Ufer.

Bei einer detaillierten Betrachtung der vertikalen Wasserstandsschwankung konnte gezeigt werden, dass unter gesteuerten Bedingungen die WSA im Verlauf des OHB abnehmen, um dann in der Nähe der Mündung wieder anzusteigen. Bei natürlichen Ereignissen dagegen sind die größten Schwankungen an der Mündung zu finden. Wie erwähnt (siehe Kapitel 6.1.1.3), hängt dies einerseits mit den standortspezifischen Verhältnissen (hydrologische Anbindung und Lage) sowie den besonderen Rückstauprozessen im PG zusammen, auf die nun etwas näher eingegangen werden soll. Allgemein beeinträchtigen Rückstauprozesse an aufgestauten bzw. staugeregelten Flüssen die natürliche Fließgewässerdynamik auf verschiedene Weise (HENRICHFREISE 2001, FOECKLER et al. 2010, OFENBÖCK et al. 2011).

DISTER (1997) führt für verschiedene Abflüsse die Stauauswirkung auf: Bei HQ = 1430 m³/s endet der Stau einfluss nach bayerischer Donaukilometrierung bei km 122,6 kurz oberhalb der Mündung des OHB), bei MHQ = 1050 m³/s bei km 121 (bei der „1. Rückleitung“), bei Q = 500 m³/s bei km 120 (etwa in der Mitte des Albenschüttweihers).

Eine genaue Untersuchung der Rückstauprozesse ist im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgt, da hierzu in erster Linie Fließgeschwindigkeitsmessungen nötig wären, die mit den zur Verfügung stehenden Methoden nicht durchführbar sind. Für diese speziellen hydrologischen Messbedingungen, wie sie bei Rückstauprozessen vorkommen, sind Ultraschallmesssysteme oder Radar unverzichtbar (vgl. HIDAYAT et al. 2011, KÖHLER et al. 2015).

Über die (sehr vereinfachte) Annahme, dass die geringsten WSA dort auftreten, wo der Einfluss des Rückstaus am geringsten ist, also am weitesten von der Einströmstelle entfernt liegt und gleichzeitig bei der Gerinnegeometrie keine wesentlichen Veränderungen auftreten, lässt sich der Bereich um Pegel 8 als besonders schwankungsschwach identifizieren. Mit einem Rückblick auf Abb. 6.1-7 zeigt sich hier mit dem Schnittpunkt der Hochwasserlinie (orange) und der Linien der ÖF (grau und grün) der Bereich mit den geringsten Schwankungen. Durch die vor der Pionierbrücke (Abb. 4-17) liegenden, flach auslaufenden Ufer fällt auch dort (Pegel 6) ein Wasserstandsanstieg gering aus.

Detailbetrachtungen von Datenreihen lieferten die Erkenntnis, dass der Pegelstand aufgrund der maximal zur Verfügung stehenden Ausleitungsmenge von 30 m³/s, unabhängig von der Dauer einer ÖF, nicht mehr weiter zunimmt (Abb. 6.1-18). Vergleichbare Ganglinienverläufe lassen sich bei Abflussganglinien gesteuerter Hochwasserrückhaltebecken mit konstantem Abfluss finden (VISCHER & HAGER 1992, MUTH 2001). Dabei ist interessant, dass die Füll- und Entleerungszeiten kürzer sind und das Retentionsvolumen kleiner als bei ungesteuerten Anlagen. Dies ist für Hochwasserrückhaltebecken sicher als Vorteil zu bewerten, für Ökologische Flutungen stellt es sich als eher nachteilig dar. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 7-2.

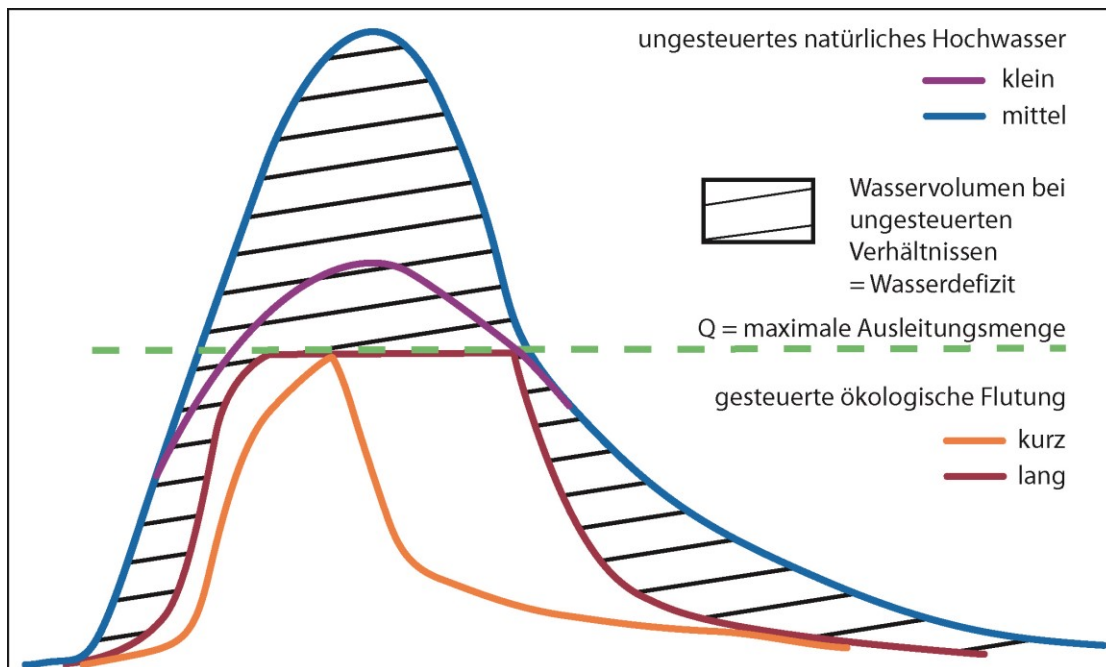


Abb. 7-2: Schematische Darstellung zwischen gesteuerten und ungesteuerten Verhältnissen bei ÖF und natürlichem Hochwasser (FISCHER & CYFFKA 2014, S. 175) .

7.1.2 Unterschiede zwischen Hochwasser und Ökologischer Flutung

Deutlich ist bei allen Pegeln der Unterschied zwischen einem natürlichen Hochwasser und einer gesteuerten Flutung zu erkennen. Besonders stark zeigt sich der unterschiedliche Wasserstandsverlauf zwischen den einzelnen Pegelstandorten bei den ÖF. Der Verlauf der Ganglinien lässt gleichmäßigere hydrologische Verhältnisse bei einem natürlichen Ereignis vermuten, während sich bei ÖF offensichtlich andere und räumlich differenziertere Verhältnisse bzgl. der Wasserstände ergeben (Instationarität). Auch Unterschiede zwischen den ÖF selbst konnten bereits bei FISCHER und CYFFKA (2014) nachgewiesen werden.

Eine Erklärung können hintereinander geschaltete Speicher liefern. In der Hydrologie werden oft lineare Speicher oder Speicherkaskaden herangezogen, um für Flussabschnitte eine Speicherbeziehung zu simulieren (vgl. diverse Flood-Routing-Verfahren). Die auf Flüsse angewandte Vorstellung kann auch in grober Annäherung auf den Auwald übertragen werden. Folgen wir dieser Vorstellung, stehen die unterschiedlichen Auengewässerkörper entweder oberflächlich oder über Grundwasseranschluss miteinander in Verbindung. Bei einer ÖF werden verschiedene Speicher gleichzeitig oder nacheinander versetzt gefüllt. Lange und kurze Fließwege führen zudem zu unterschiedlichen Füll- und Reaktionszeiten, was im Verlauf des ansteigenden und abfallenden Astes der Ganglinien der jeweiligen Gewässer deutlich wird.

Während es unter natürlichen Bedingungen aufgrund einer flächenhaften Ausbreitung des Wassers aus dem Fluss bei steigendem Wasserstand zur weitläufigen Ausuferung kommt, entstehen bei ÖF (und auch bei natürlichem Hochwasser im PG) nur vereinzelt

Überflutungsflächen (punktuelle Ausleitung, Streichwehr) und das meiste Wasser verbleibt nahe den bordvollen Abflussbedingungen – meist noch mehrere Dezimeter darunter – im Gewässerbett. Im Gewässer konzentrieren sich auch die morphologischen Veränderungen, die Auenfläche bleibt morphologisch weitgehend unbeeinflusst.

Während verschiedene Autoren (BRAY 1982, NADOLNY 1994, HUMBORG 1995 IN SCHERLE 1999, EMMETT & WOLMAN 2001, ALP et al. 2011) jeweils unterschiedliche Wiederkehrzeiten (zwischen 1,3 und 100 Jahren) von bordvollen Abflüssen ermitteln, kann nach SCHERLE (1999) der MHQ in grober Näherung dem bordvollen Abfluss entsprechen. Für die eigendynamische Entwicklung ist besonders der bettbildende Abfluss maßgeblich, der die größten erosiven Kräfte entfaltet. Dieser entspricht wiederum in grober Annäherung dem bordvollen Abfluss und tritt vereinfacht bei jeder Ökologischen und jeder natürlichen Flutung auf – damit also wesentlich öfter als an FG anderer Untersuchungen, die keine ÖF erfahren. Allerdings wird hier erneut die Diskrepanz zwischen dem gesteuerten OHB und natürlichen FG deutlich, denn es gibt auch keine Abflüsse dazwischen, wenn man von der kurzen Phase der Anpassung absieht. Ein Abfluss zwischen $5 \text{ m}^3/\text{s}$ und $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (wenn wir von dem rein rechnerisch ermittelten Maximalwert ausgehen) kommt nur während dieser Übergangsphase vor, Abflüsse über $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (nach bisherigen Ergebnissen also eher $23 \text{ m}^3/\text{s}$) nur ab einer natürlichen Flutung, also etwa ab einem HQ_2 . Abbildung 7-3 zeigt eine vereinfachte Modellvorstellung der Abflusssteuerung im OHB mit den Abflusswerten aus Tabelle 4-5.

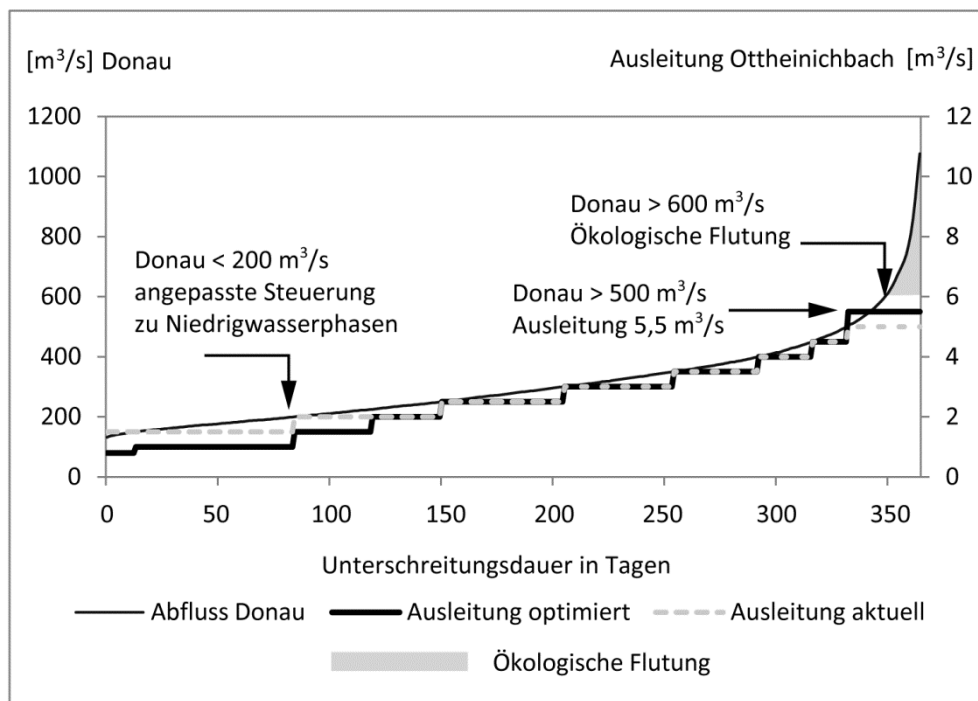


Abb. 7-3: Schematische Darstellung der Abflussverhältnisse (vgl. Tab. 4-5) im OHB mit mittlerer Dauerlinie der Unterschreitungstage.

7.1.3 Überflutungsflächen

Nach MARGRAF (2004) (publiziert vor Baumaßnahmen und Umsetzung der drei Maßnahmen) beschränkt sich die Wirkung eines HQ_1 auf einen höheren Wasserstand in den Flutrinnen und Altwässern. Die Ergebnisse nach der Renaturierung (gemeint ist hier die Anbindung an die Donau) zeigen eine erhöhte Dynamisierung bereits ohne zusätzliche Wasserausleitung. Mit Unterstützung durch Zufluss über das „Ausleitungsbauwerk für ÖF“ und Inbetriebnahme des OHB werden die Wasserstände zusätzlich erhöht und an den meisten Standorten dynamisiert. Dennoch bleibt die Wirkung bis zu einer ÖF Stufe 3 (vgl. Tab. 6.1-8) auf Flutrinnenstandorte und eine Anhebung der Wasserstände in den Auengewässer beschränkt.

Bei einem HQ_5 wurden vor Maßnahmenbeginn, von den Rinnen ausgehend, weitere Bereiche im Auwald durchströmt. MARGRAF (2004) berichtet von einer anschließenden Überflutung der Gleitufer-Bereiche und des tief liegenden Geländes. Im Anstauereich der Staustufe Ingolstadt erfolgte vor dem Hochwasserdeich eine flächige Überflutung und punktuell wurde der Uferbereich überströmt. Gleiche Beobachtungen konnte der Verfasser während des August-Hochwassers 2010 machen und mit etlichen hier noch manuell abgelesenen Wasserstandsmessungen (Messlatten) für unterschiedliche Auengewässer belegen.

Durch die zusätzlichen Anbindungen des OHB an die Donau („Temporäre Rückleitung ÖF“ und „1. Rückleitung“) verläuft die Aktivierung der Flutrinnensysteme wesentlich früher. Auch durch den Umbau des ehemaligen Auslaufs des Zeller Kanals (Rückschlagklappe) erfolgt der Einstrom mit steigendem Donauwasserstand seit 2009 wesentlich früher.

Ab HQ_5 bis HQ_{10} ($1.300-1.400 \text{ m}^3/\text{s}$, gemäß Bescheid bereits ab $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$) erfolgt eine Hochwasserentlastung über das Streichwehr. Tatsächlich konnte zum Zeitpunkt des (ersten) Überlaufens beim Hochwasser 2013 ein Abfluss von $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Pegel Ingolstadt) registriert werden.

Ab HQ_{10} werden nach Ausführungen von MARGRAF (2004) die tieferen Lagen des östlichen UG zwischen „Alter Donau“ und Hochwasserdeich überflutet. An mehreren Stellen fließt die Donau vom Ufer aus in die Aue ein. Diese Beobachtung konnte auch 2013 während des Hochwassers vom Verfasser gemacht werden und über Begehungen wurden die tiefer liegenden Überlaufstellen lokalisiert und zusammenhängende Überflutungsflächen kartiert (Abb. 6.1-17). Im Westen bleiben die Verhältnisse etwa wie vor der Dynamisierung, es herrscht eine Beschränkung auf die direkt an Flutrinnen angeschlossenen Bereiche. Vor der Staustufe Bergheim ist die Donau durch den Stauhaltungsdamm von der Aue abgetrennt. Über die automatisch loggenden, temporären Pegel (tPÖF) wurden die Wasserstandsmessungen für unterschiedliche Auengewässer hochaufgelöst (15-Min-Intervall) erfasst.

Beim HQ_{180} (1999) bleiben nur die höchstgelegenen Bereiche trocken. Die Überflutungshöhe in den Rinnen betrug maximal 3 bis 4 m, auf den Flächen meist bis zu 1,5 m (MARGRAF 2004).

Inwieweit sich die Veränderung der Überflutungsflächen bei ÖF von der realen bzw. errechneten oder modellierten Höhe auswirken, konnte in Abbildung 6.1-17 gezeigt werden.

Nach einer Modellierung (RMD CONSULT 2004A) sollen drei Bereiche großflächiger überstaut werden. Die Kartierung der tatsächlich überfluteten Bereiche bleibt dabei deutlich hinter den berechneten Überschwemmungsflächen zurück. Allerdings werden auch bei einer ÖF Stufe 3 bereits Flächen überstaut, die nach der Modellierung nicht geflutet werden. Dies sind v.a. angeschlossene Flutrinnen und tief liegende Bereiche.

Wie bereits bei MARGRAF (2004) festgestellt wurde, sind die Karten zur Ausbreitung der Überflutungsflächen, die von SCHLEGEL (2000D) angefertigt wurden, mit gewissen Einschränkungen zu sehen. Die Karte für das HQ_{180} stimmt allerdings mit den von ihr getroffenen Beobachtungen weitgehend überein. MARGRAF (2004) nennt folgende Punkte, warum es zu Abweichungen kommt:

- Es erfolgt keine Differenzierung bei den Überflutungsflächen zwischen Donauwasser und Hochwasser durch ansteigendes Grundwasser.
- Die Karten sind nur anzuwenden bei volliger Durchfeuchtung der Böden und für Hochwasserereignisse mit mindestens mittlerer Dauer.
- Es werden keine Strömungshindernisse und Barrieren berücksichtigt.
- Die Tatsache, dass der Wasserspiegel nicht gerade verläuft, sondern zum Rand hin abfällt wird nicht berücksichtigt.

Damit konnte MARGRAF (2004) für das HQ_{10} am 13.08.2002 feststellen, dass für Hochwasser von kurzer Dauer die Fläche der überschwemmten Bereiche überschätzt wird und auch die Überflutungshöhe von 0,5 m zu hoch angesetzt ist. Gleiches gilt für das HQ_5 und vermutlich auch für das HQ_1 . All diese Aussagen können auch durch die vorliegende Arbeit bekräftigt werden.

Bei der Modellierung, die von BOCK et al. (2006) mit dem „pre-processed DTM“ vorgenommen wurde, wurden die Überflutungsflächen über den Wasserstand einer automatisch generierten Tiefenlinie (mit 2,0 m und 2,5 m) ermittelt. Auch dabei entstanden nicht die Flächen, die tatsächlich bei einer Flutung erreicht werden.

Die Gründe für die Diskrepanz zwischen der Vorhersage (Modellierung) und den tatsächlich eintretenden hydrologischen Verhältnissen bzgl. der Überflutungsflächen sind vielfältig:

- (1) Zum einen sind hier die morphologischen und hydrologischen Grundlagen- und Eingangsdaten zu nennen, die zur Planungsphase in guter Qualität (z. B. ein 2 m DGM, Gerinne im Planungszustand) vorlagen, dennoch aber gewisse Einschränkungen (Lagegenauigkeit 0,5 m und Höhengenaugkeit $\pm 0,2$ m für das DGM) mit sich bringen. Wesentliche Auenprozesse lassen sich nur mit hochaufgelösten Daten darstellen (HOLLAUS et al. 2005, GETIRANA et al. 2009). Bessere Ergebnisse könnten vermutlich mit Daten in höherer Auflösung, wie beispielweise mit dem aus Laserscandaten generierten Höhenmodell des

tatsächlichen Gerinnes (0,05 m Rasterweite) und mit aktualisierten Eingangsdaten (Gerinne nach der Bauphase), erzeugt werden. Auch kleine Flutrinnen und Unterbrechungen in Flutrinnen sowie Senken mit 0,2 m sind hydrologisch wirksam und können zu einer anderen Verteilung (räumlich und zeitlich) oder zu Rückstau von Wasser führen. Solche Kleinststrukturen können im DGM nicht ausreichend abgebildet werden (vgl. (MANDLBURGER ET AL. 2009A; HÖFLE ET AL. 2009). Da jedes Modell immer eine Vereinfachung der Wirklichkeit darstellt, ergeben sich zwangsläufig Unterschiede.

- (2) Zum anderen wurde für die 2D-Wasserspiegelberechnung der Ökologischen Flutungsflächen (RMD CONSULT 2004A) ein Bemessungsereignis mit folgenden Durchflüssen (Q) verwendet: Q-Donau mit $650 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ (nach generierter HQ₁-Ganglinie), Q-LMB mit $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, Q-Ausleitungsbauwerk ÖF mit $25,0 \text{ m}^3/\text{s}$ und Q-Ausleitungsbauwerk OHB mit $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Dauer einer ÖF wurde dabei mit sieben Tagen angesetzt.
- (3) Das zur Berechnung (siehe (2)) angenommene Wasservolumen ist wesentlich größer als das statistisch 2 bis 3 mal im Jahr auftretende Hochwasser, bei dem eigentlich ökologisch geflutet werden soll, und größer als die meisten tatsächlich auftretenden Hochwasserereignisse. Viele kleinere Ereignisse bleiben unter $900 \text{ m}^3/\text{s}$. Zudem waren in 62 % der Fälle (165 HQ-Ereignisse zwischen 1939 - 2000) die HQ-Ereignisse kürzer als die zur Berechnung angenommenen sieben Tage (SCHLEGEL 2001B) bzw. 42 % der 128 Hochwasserereignisse zwischen $600 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ dauerten keine 5 Tage (HERRMANN 2001). Hinzu kommt, dass bereits ab $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ die ÖF wieder beendet wird, um so maximalen Retentionsraum für den Hochwasserrückhalt vorzuhalten.
- (4) Ein deutlicher Wasserverlust (für das östliche PG) ist auf den ersten Kilometern nach dem Ausleitungsbauwerk im Bereich des Längenmühlbachs zu verzeichnen. Ein Grund ist die Versickerung über den Schotterkörper ins Grundwasser. Gerade in Kiesablagerungen kommt es schnell zur Exfiltration und dies kann, wie auch Studien an anderen Flüssen belegen (WINTER et al. 1998, SCHWARTZ et al. 2000, HANCOCK et al. 2005), die hydrologischen Verhältnisse entsprechend beeinflussen. Abflussmessungen während ÖF konnten das bestätigen (FISCHER et al. 2012A). Damit kann die Exfiltration in die hyporehische Zone und Umgebung belegt werden, was am deutlichsten in dem Seespiegelanstieg direkt nach der Eröffnung nachgewiesen werden konnte. Im 75 m von UG_{Gew} entfernten „Kleinen Schlossweiher“ konnte nur wenige Stunden nach Inbetriebnahme des OHB ein Anstieg von 0,55 m aufgezeichnet werden (STAMMEL et al. 2012). Ähnliche Wasserstandsanstiege in Grund- und Oberflächenwasserkörpern konnten bei Polderflutungen (Vieser 1999) und während Hochwasserereignissen (Heiler et al. 1995, Scholz et al. 2009) gemessen werden.
- (5) Das begrenzte Ausleitungsvolumen von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ und die kurze Dauer ergeben weitere Einschränkungen. Die ohnehin kurze Dauer einer ÖF verkürzt sich aufgrund der ermittelten Fließzeit vom Ausleitungsbauwerk bis zum Übertritt von Wasser über

die Flutmulden zum Ottheinrichbach zusätzlich. Auf diesen Nachteil wurde auch bereits von HERRMANN (2001) hingewiesen. Manchmal entsteht auch durch die halbautomatische Steuerung (nach Betriebsvorschrift muss ein Vertreter der Wasserwirtschaft vor Ort sein) eine weitere Verzögerung bei der Öffnung des Ausleitungsbauwerks.

- (6) Auch die Beschränkung auf eine Ausleitungsstelle über das Bauwerk bei einer ÖF spielt sicherlich eine Rolle, da normalerweise eine Überflutung flächig erfolgt und sich nicht auf nur eine punktuelle Ausleitung konzentriert.
- (7) Bei der Ermittlung des Eintiefungsverhältnisses nach ROSGEN (1994) wurde deutlich, dass die Überflutungsgrenze bei Hochwasserständen, ermittelt über die zweifache bordvolle Tiefe über der Gewässersohle, die ganze Aue betreffen würde. Demnach wäre also nicht die Eintiefung des OHB in die Donauaue, sondern die Abflussmenge als limitierender Faktor anzusehen. Im Umkehrschluss sollte allerdings bei fixierter Ausleitungsmenge und fehlender Ausuferung das Verhältnis (Überflutungsgrenze von Hochwasserereignissen zu bordvoller Breite) vergrößert, also der zu durchfließende Gerinnequerschnitt durch Sohlanhebung verkleinert werden, um Ausuferungen zu erleichtern.
- (8) Der entscheidende Faktor bleibt aber der Flusswasserspiegel in der Donau. Die Ausbreitung der Flutungsflächen wird durch Rückstauprozesse entscheidend beeinflusst, deren Wirkung kurz vor dem Abklingen (direkt nach dem Hochwasserscheitel) am größten ist. Generell ist für das Ausmaß von Überflutungsflächen der Wasserstand im Vorfluter maßgeblich (vgl. LIGHT et al. 2006), im Projektgebiet ist er entscheidend (Abb. 6.1-17). Dies hat auch Auswirkungen auf die Grundwasserstände, die hier nicht näher betrachtet wurden. BECKER et al. (2014) sprechen in diesem Zusammenhang auch von „unterirdischem Hochwasser“, also einem starken Grundwasseranstieg, der durch Hochwasser im Fluss verursacht wird und wesentlich zu Überflutungen beiträgt.
- (9) Auch die Eintiefung des Vorfluters führt zu einer Verkürzung der Dauer, und Hochwasser sind seltener, wenn Flusswasserstände durch Tiefenerosion tiefer liegen (SHIELDS et al. 2009). Zwar haben die Dauer und die Ausleitungsmenge einer ÖF immer noch einen Einfluss auf die Überflutungsflächen, sind aber bei zu niedrigem Donaudurchfluss (etwa unter 850 m³/s (Pegel Ingolstadt)) beinahe wirkungslos.

Einzelne Projekte, die zum Vergleich herangezogen werden können, wurden von HERRMANN (2001) aufgeführt. Bei allen drei genannten Projekten (Polder Altenheim, Altwasserverbund-System am Oberrhein und Gießgang Greifenstein in den Donauauen bei Wien) werden die nicht ausreichende Wassermenge oder mit ihr verbundene Größen (Dauer, Häufigkeit) als gemeinsames Defizit genannt (vgl. KRAUSE & HUEGIN 1987, VIESER 1999, WASSERMANN 1999). Die fehlende Aufmerksamkeit gegenüber einer ökologischen Regelung von Niedrigwassersphasen beim Polder Altenheim wird von HERRMANN (2001) als weiteres Manko angesprochen.

7.2 Fluvial-Morphologische Betrachtungen

Bei einer naturnahen Gewässerentwicklung geht man davon aus, dass das FG selbst in der Lage ist, naturnähere Lauf- und Bettstrukturen zu entwickeln. Insbesondere bei neu angelegten FG spielt der dafür vorgesehene Zeitraum eine große Rolle. Durch meist nur kurzfristig geförderte Projekte ist der für Natur- und Artenschutz benötigte Zeitraum für eine eigenständige Entwicklung oft nicht mehr in der „Aufmerksamkeit“ und danach einsetzende Entwicklungen bleiben unberücksichtigt. Ein Vorteil ist allerdings, dass gerade am Anfang viele der Prozesse schneller und manchmal auch in kürzeren Abständen als in natürlichen Systemen ablaufen. Auch wenn die Reaktionszeit auf der Mikro- und Mesoebene manchmal sogar kleiner als das Erfassungsintervall ist und kleinere Formen wie Sandrippel schon wieder verschwunden sind, bevor sie überhaupt detektiert werden konnten, braucht die ökologisch wirksame Regeneration und Anpassung eines FG entsprechend lange. Eine Anpassung der Linienführung kann eher von Generationen von Wissenschaftlern dokumentiert werden als von einem alleine. Zeiträume, die Bäche in England zum Durchwandern der Aue benötigen, hat HOOKE (1980) auf 600 bis 6000 Jahre geschätzt. Um aber Umlagerungsprozesse der ersten Stufe bei einem „metastabilen-dynamischen“ Gleichgewichtssystem (vgl. Kapitel 2, Abb. 2-1) zu beschreiben, sind 4-5 Jahre ein geeigneter Betrachtungszeitraum.

Ob allerdings überhaupt eine gewässertypische Entwicklung einsetzt, ist nicht immer von vornherein klar, und wie groß die Entwicklungsgeschwindigkeit ist, hängt – wie gezeigt wurde – von vielen Randbedingungen ab. Nicht alle können nachfolgend diskutiert werden, aber einige Ergebnisse oder einzelne Parameter laden ein, sie in einem größeren Kontext zu betrachten. Insbesondere wird nachfolgend auf die Erkenntnisse eingegangen, die sich im Zusammenhang mit den TLS-Messungen ergeben haben (Kapitel 6.2.4).

Eine fehlende Harmonie in der Laufform kann leicht erkannt werden. Die Ausprägungen zur Linienführung des OHB sind mit den zum Teil überdurchschnittlichen Gewässerdimensionen eines ehemaligen Donauarms und der hydraulisch-bautechnisch optimalen Trassenführung (SCHLEGEL 2000c) für das Umgehungsgewässer zu begründen. Eine Abweichung von einer natürlichen Mäanderbildung und Grundrissform besteht ohne Zweifel und kann an den 90°-Kurven und den schnellen Richtungswechseln abgelesen werden.

Nach BROOKES und GREGORY (1988 in SCHERLE 1999) und KERN (1994) ist die Rückentwicklung eines FG ein sehr langsamer Prozess, der in Zeiträumen zwischen 10 Jahren und mehreren Jahrhunderten abläuft. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass viele der größeren (meso-makro) geomorphologischen Strukturen ein relativ hohes Alter haben und für ihrer Entstehung sehr lange Zeiträume benötigen. Aufgrund ihres Alters sind Terrassenkanten oder Brennen nicht wiederherstellbar und deswegen unersetzbar (NIEHOFF 1996). Die Entstehungs- und Alterungsprozesse von Auenstrukturen (SCHERLE 1999, LÜDERITZ & JÜPNER 2009) machen deutlich, dass nur Auen, deren Gewässer ständig ihren Lauf verlagern und häufig Überflutungen verursachen, auch ausgeprägte Auenstrukturen besitzen können.

Alle geomorphologischen Strukturen, ob groß oder klein, bilden innerhalb der Gewässerlandschaft unterschiedlichste Lebensräume aus und tragen entsprechend zur Biotop- und Artenvielfalt bei. Da jedes FG einen individuellen Charakter aufweist, sind Art, Vielfalt und Vorkommen von diesen natürlichen Strukturen unterschiedlich. Während allgemeingültige Angaben zur Häufigkeit des Auftretens solcher Elemente nicht gemacht werden können, kann nach NIEHOFF (1996) eine generelle Feststellung zum Wert dieser natürlichen Strukturen gegeben werden. Demnach ist der Schutzwert des Ufers um so größer, je häufiger verschiedenartige Strukturelemente vorkommen.

7.2.1 Totholz

Wenige Studien dokumentieren den Umfang an Totholz, das transportiert wird. RUISINGER (2014) konnte für den OHB zeigen, dass auch seit den ersten Kartierungen (vgl. Kapitel 6.2.2.1) die Totholzdynamik weiter anhält und Stämme und Wurzelstöcke weiterhin verlagert werden. Von den 78 Elementen, die von RUISINGER (2014) in der Neubaustrecke kartiert worden sind, konnten 25 dem Typ „Ansammlung“ zugewiesen werden. Derartige Totholzansammlungen konnten vor 2013 (letzte Kartierung durch den Verfasser 2012) nicht beobachtet werden und sind erst im Laufe der Zeit, sicher auch durch das Hochwasser 2013 entstanden. Diese meist komplexeren Totholzansammlungen sind besonders lagestabil und führen zu Verklausungen (GERHARD & REICH 2001). Sie haben sich demnach erst nach etwa 2,5 Jahren im OHB gebildet. GREGORY und DAVIS (1992) führten beim Vergleich von 22 Artikeln Verweilzeiten von Dämmen von über 200 Jahren an. Andererseits haben sich in einem kleinen FG auch 270 „LWD jams“ (large woody debris) in weniger als 12 Monaten verändert (GREGORY et al. 1985 in CURRAN 2010).

BILBY (1984) untersuchte die Verfrachtbarkeit einzelner Totholzelemente in Abhängigkeit ihrer Größe. Eine Abhängigkeit von der Größe und der Verfrachtungsstrecke konnte aber nicht festgestellt werden, alle nicht verankerten, also frei liegenden, Totholzelemente wurden verfrachtet und in einem Abstand von ca. 100 m wieder gefunden. Dies deckt sich etwa mit den Erfahrungen im UG, allerdings war der bisher zurückgelegte Weg wesentlich länger als 100 m. Die späte Bildung von Totholzansammlungen und die längeren Driftstrecken hängen unmittelbar zusammen, da in „verklausungsfreien“ Gewässern gerade kleinere Totholzelemente leicht verlagert werden können. Dies ist für Renaturierungsvorhaben bedeutend, denn will man standfestes Totholz, muss es verankert werden, worauf auch verschiedene Empfehlungen hinweisen (GERHARD & REICH 2001, DICKHAUT et al. 2006, CURRAN 2010). Auch Wurzelstöcke, die aufgrund ihrer komplexen Form relativ schwer verlagert werden können, sind davon betroffen, werden sie nicht teilweise in Ufer oder Sohle eingebaut. Nach Beobachtungen des Verfassers bleiben sie irgendwann auf der Sohle als Unterwasserstruktur liegen und werden allmählich zusedimentiert, was sie von Baumstammstücken unterscheidet, die eher an der Oberfläche bleiben.

Totholz ist wie gezeigt werden konnte, der wesentliche Faktor im OHB, der auch nach der ersten Anpassungsphase die morphologische Entwicklung weiterhin steuern kann, da

aufgrund der fehlenden Geschiebenachlieferung Totholz die einzige „erneuerbare Energiequelle“ für morphologische Veränderungen darstellt. Erstaunlich ist die Tatsache, dass der Transport teilweise auch über bzw. durch die Ausleitungsbauwerke und die Flutmulden hinweg gelingt (siehe Empfehlung 4, Kapitel 8.2).

Die hydraulische Wirkung von Totholzelementen ist stark abhängig von ihrer Position und Ausrichtung im Gewässer. Je nach Lage wird die Strömung unterschiedlich abgelenkt und es werden unterschiedliche Erosionsprozesse an der Gewässersohle und/oder an den Uferbereichen eingeleitet. Totholz und Bäume, die an der Uferlinie wurzeln, nehmen lokal Einfluss auf das Gerinnebettmuster, indem Strömung und hydraulische Geometrie verändert wird (KELLER & SWANSON 1979). Besonders an kleinen FG haben Vegetation und grobes Sohlsubstrat verhältnismäßig große Dimensionen. Sie sind damit nicht nur Ausdruck einer Anpassung an Fließzustände, sondern vermögen ihrerseits die Gerinnemorphologie zu beeinflussen – das trifft auch auf den OHB zu. ZIMMERMAN et al. (1967) und MILLAR (2000) haben bei ihren Untersuchungen an Flüssen mit kleinen Einzugsgebieten festgestellt, dass Form und Größe der Gerinne nicht nur vom fluvialen Geschehen abhängig ist, sondern von der lebenden und abgestorbenen Vegetation, einzelnen Steinblöcken etc. Nach OTTO (1991) und TRIMBLE (1997) sind Wiesenbäche nur ein Drittel bis halb so breit wie Aubäche im Wald, aber dafür deutlich tiefer. Gewässerbegleitende Bäume können mit ihren Wurzeln den Verlust von Boden minimieren, da sie nach MADSEN und TENT (2000) mehr als 50 Tonnen Boden festhalten können. Wenn sie als Sturzbäume ins Gewässer gelangen, wird eine Sedimentquelle aktiviert, die maßgeblich die stromabwärtsliegende Gerinnemorphologie beeinflusst, was eine Veränderung der Querprofilform miteinschließt.

7.2.2 Riffle-Pool-Abfolgen

Die Abfolge von Riffles und Pools ist in Flussabschnitten strömungsdynamisch bedingt. Da auszuschließen ist, dass auch ein erfahrener Baggerführer ähnlich und im gleichen Abstand Sohlformen so dynamisch anlegen würde, wie es FG natürlicherweise tun, ist von einem Ungleichgewicht auszugehen (dies trifft selbstverständlich auch auf andere Strukturen zu, soll aber nicht weiter diskutiert werden). Die Ergebnisse der Erfassung der Riffle-Pool-Abfolgen bestätigen dies und zeigen eine Veränderung über den Beobachtungszeitraum. Über die Querprofilvermessung konnte auch eine zunehmende Verfüllung von Pools detektiert werden. Eine Quantifizierung wurde noch nicht vorgenommen, kann aber theoretisch aus den Akkumulationsflächen abgeleitet werden. Die größte Sedimentfalle ist das Wetterloch, da hier allein am Querschnitt des Profils ein Zuwachs von über 1 m gemessen wurde.

Von diesem Ungleichgewicht ausgehend ist es nicht verwunderlich, dass weder über die Kartierung und Vermessung der Riffle-Pool-Abfolgen noch über die Bestimmung nach RICHARDS (1976A) der in der Literatur als durchschnittlich angegebene Abstand von Riffles resp. Pools erreicht wird. Die Wertespanssen liegen entweder weit unter oder über dem allgemein anerkannten 5 bis 7-fachen der Gerinnebreite. Besser würde die 3 bis 9-fache Breite passen, die von KELLER und MELHORN (1978 in SCHERLE 1999) beobachtet wurde.

Sicher müssen bei dieser Diskussion auch die Unterschiede der Abgrenzung mit berücksichtigt werden, aber dennoch kann in den Sohlformen eine von natürlichen FG abweichende Ausprägung festgestellt werden. Die Veränderungen in der Sohltopographie sind jedenfalls noch nicht abgeschlossen und werden sich in den nächsten Jahren noch weiter verändern. Während sich Furten bzw. Riffles u.U. über längere Zeiträume hinweg kaum verändern, sind Kolke einer ständigen Veränderung unterworfen (SCHERLE 1999, BRUNKE et al. 2012). Festzuhalten ist, dass an den Stellen, an denen sich jetzt Riffles befinden, keine künstlich angelegt wurden. Sie sind eine Folgeerscheinung der eigendynamischen Entwicklung. Wie bereits im Methodenkapitel erläutert, waren Riffles gegenüber Pools bei der Aufnahme schwerer abzugrenzen. Da für alle Umgebungs-bäche die Auflage besteht, die Funktion der Durchgängigkeit wieder herzustellen, werden vermutlich ohnehin keine „wirklichen“ Riffles angelegt, sondern eher, wie die in dieser Arbeit auch aufgenommene, höher liegende Stellen in der Gewässersohle geschaffen. Es bleibt offen, ob und wie sich der OHB anders entwickelt hätte, wenn keine tiefen Stellen (Pools) in der Sohle oder diese an einem anderen Ort angelegt worden wären.

7.2.3 Querprofilvermessung

Im Laufe der diversen Flussbaumaßnahmen wurde das natürliche Breiten-Tiefen-Verhältnis der meisten Fließgewässer in der Regel anthropogen verändert. Kennzeichnend ist eine erhebliche (oft fixierte) Einengung der Bettbreite, einhergehend mit Tiefenerosion. Bei neu angelegten naturnahen FG wird der Gerinnelauf und -querschnitt vorgegeben, eine Anpassung muss erst noch erfolgen. BROOKES (1987) und SCHERLE (1999) haben die Breitenerosion als wesentlichen Faktor bei Rückentwicklungen herausgestellt.

Aus der QP-Datenbank konnten verschiedene Maßzahlen berechnet werden, die zur Beschreibung des Gewässerquerschnittes, der Form und der Dimension herangezogen wurden.

Die Beobachtung und Ermittlung der naturnahen gewässertypischen Breiten- und Tiefenmaße und anderer Kennwerte kann den Zustand und die Entwicklung des jeweiligen Gewässers gut beschreiben (DA SILVA 1991, MARTI 2006, REQUENA 2008). Ein Vergleich zu einem vor Renaturierung definierten Entwicklungsziel oder einem über ein Leitbild festgelegten Referenzzustand lässt sich auch mit einfachen Querprofilvermessungen durchführen. HARNISCHMACHER (2002) konnte zeigen, dass querprofilbeschreibende Größen auch einen Einfluss auf den Gewässergrundriss haben.

Bei der Beurteilung eines Gewässers muss eine zu große Gewässertiefe als gewichtigeres Defizit angesehen werden als eine zu kleine Tiefe (SCHERLE 1999). Dies trifft besonders auf die auf das bordvolle Niveau bezogenen Tiefenmaße zu, da ein im Vergleich zum umliegenden Auenniveau tief eingeschnittenes Gewässer nur wenig Ausuferungskapazität aufweist. Dies konnte mit der Ermittlung des Eintiefungsverhältnisses (vgl. ROSGEN 1994) auch indirekt bestätigt werden. Wenn der bordvolle Abfluss bereits dem maximalen Abfluss

entspricht, kann nur noch durch eine Veränderung des durchflossenen Querschnitts eine Ausuferung erfolgen.

Natürliche Gewässer weisen neben dem variierenden Erosionsprofil oft ein kastenförmiges Profil auf (SCHERLE 1999, DAHM et al. 2014) und zeigen dementsprechend einen großen oder kleinen Wert des Breiten-Tiefen-Verhältnisses. Hohe Verhältniszahlen am OHB zeigen, dass an diesen Stellen (siehe Anhang 6.2-4) die Wasserspiegelbreite bei Mittelwasser deutlich von der bordvollen Breite abweicht. Dies ist an den meisten Standorten jedoch eher auf das im Regelprofil angelegte Gewässer als auf eine tief liegende Überflutungsfläche oder Wasserwechselzone zurückzuführen. Einzelne QP zeigen allerdings eine deutliche Verbreiterung bei bordvollen Abflussbedingungen.

Die festgestellten Zusammenhänge zwischen Gerinnebreite, -tiefe und dem bordvollen Abfluss wurden bereits von LEOPOLD & MADDOCK (1953) empirisch erarbeitet. Gerade die Verbreiterung, also die in der Literatur (LEOPOLD & MADDOCK 1953, KELLERHALS 1967) beschriebene und im Vergleich zur Gerinnetiefe größere Zunahme der Gerinnebreite im Längsverlauf, kann aufgrund der Kürze des Laufabschnittes nicht bestätigt werden. Sowohl bei bordvollen Abflussbedingungen als auch bei den auf den mittleren Wasserspiegel bezogenen Größen ist keine Veränderung im Verlauf festzustellen.

In der Literatur finden sich zahlreiche Beispiele, bei denen mit feiner werdendem Sohlmaterial das mittlere Breiten-Tiefen-Verhältnis abnimmt (SCHUMM 1960, RICHARDS 1982, NADOLNY 1994, SCHERLE 1999). Da Untersuchungen zum Sohl- und Ufersubstrat am UG_{Gew} in ausreichender Zahl fehlen, kann die in der Literatur beschriebene Tendenz einer Abnahme des Breiten-Tiefen-Verhältnisses bei zunehmend feinkörnigem Substrat nicht nachgewiesen werden. Obwohl aufgrund verschiedener Befunde (SMETTAN & BAUER 2004) und der Geländekenntnis von einer Zunahme des Feinmaterialanteils im Verlauf des OHB auszugehen ist, lässt sich bei der Betrachtung im Längsverlauf keine Abnahme erkennen.

Bei einem Vergleich der berechneten Korrelationen zwischen bordvollem Abfluss und querprofilkennzeichnenden Variablen zeigen sich auch an naturnahen FG gute Übereinstimmungen mit den bekannten hydraulischen Beziehungen, die im Rahmen von Untersuchungen zur hydraulischen Geometrie und den Regime-Ansätzen ermittelt worden sind. Dies gilt insbesondere für die abhängigen Variablen, bordvolle Gerinnebreite und -tiefe und das Breiten-Tiefen-Verhältnis, die jeweils positiv mit dem bordvollen Abfluss korrelieren.

Ein stärkerer Zusammenhang besteht dagegen naturgemäß zwischen bordvollem Abfluss und durchflossener Querschnittsfläche, welcher allerdings aufgrund der Abhängigkeit der Variablen nicht überbewertet werden darf, da es sich bei der Fläche um das Produkt aus mittlerer Tiefe und Breite handelt. Es wird dennoch deutlich, dass tiefere, aber schmalere Querschnitte größer sind als flache, obwohl diese breiter sind. Die tiefen und schmalen Pool-Profile weisen also die höheren, die flachen und breiten Riffle-Profile tendenziell die kleineren Fließquerschnittsflächen auf.

Manchmal sind auch nur schwache oder mittlere Korrelationen zwischen betrachteten Steuer- und Zielgrößen vorhanden. Die von HARNISCHMACHER (2002) geforderte Notwendigkeit einer Differenzierung der Stichprobe (nach unterschiedlichem Gefälle) bei

unterschiedlichen FG wird insofern untermauert und ist also u. U. auch nötig, um den unterschiedlichen Randbedingungen in der Ausprägung der Fließgewässergestalt einzelner Fließgewässerabschnitte gerecht zu werden.

Untypische Werteausprägungen an einzelnen QP sind auf lokale Besonderheiten wie unnatürliche Querprofilgeometrie infolge der bautechnischen Ausführung oder auf ein außergewöhnlich bindiges Ufersubstrat an diesem Standort zurückzuführen.

Bei einem Abflussvolumen von 30 m³/s (OHB (5 m³/s) + ÖF (25 m³/s)) sollte es demnach bei 27 Querprofilen zur Ausuferung kommen. Bei 20 m³/s Abfluss, was nach den Messungen realistischer erscheint, kommt es nach der Berechnung des bordvollen Abflusses immer noch bei 16 Profilen zur Bildung von gewässerbegleitenden Überflutungsflächen.

Tatsächlich konnte während ÖF nur an sechs Profilen eine leichte Ausuferung aus dem Gewässerbett beobachtet werden. Ob nun die Diskrepanz zwischen Berechnung und Beobachtung mit der angesetzten Durchflussmenge (Kapitel 5.1.2.2) oder aber mit den aus der Querprofilgeometrie abgeleiteten Größen zurückzuführen ist, muss an dieser Stelle unbeantwortet bleiben. Insgesamt konnten aber aus den QP-Aufnahmen durchaus realistische Werte für die hydraulischen Parameter ermittelt werden.

Zur Beurteilung der weiteren Entwicklung ist es wichtig zu wissen, ob das Gewässer noch im Stadium der Breitenerosion ist oder bereits eine Breite erreicht hat, die wechselseitige Bankbildungen und in der Folge eine natürliche Laufentwicklung zulässt. Dies könnte mit den diversen Ansätzen der Regime-Theorie (SIMONS & ALBERTSON 1963, KELLERHALS 1967, BRAY 1982, MOSLEY 1983 in WAGNER 2009) oder nach den aktuelleren Arbeiten von SCHMAUTZ (2003) erfolgen.

7.2.4 Terrestrisches Laserscanning

7.2.4.1. Quantifizierung der Umlagerungsprozesse

Bei der Untersuchung von morphodynamischen Prozessen mittels TLS stand die Quantifizierung von Erosions- und Umlagerungsprozessen im Vordergrund. Anzumerken ist dabei, dass der Durchtransport von Material nicht berücksichtigt werden kann.

Während der Datenaufnahmen im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich besonders an den Prallhängen eine Überdeckung der Uferkante oder ganzer Prallhangbereiche durch Vegetation oder Wurzelteile als größter Störfaktor und Messfehler, da unweigerlich das „falsche“ Objekt für die Fragestellung der Prallhangverlagerung gescannt wird – zumindest wenn es nur um den Hang (hier dann als vegetationsloses Untersuchungsobjekt definiert) als solchen geht (vgl. Ausführungen im Kapitel 5.2.4.3). Zum anderen limitierte bei einigen Messungen der Wasserstand den Scanausschnitt, insbesondere bei Hochwasser oder einer ÖF, da die Wellenlängen des Laserstrahls des LMS-Z420i von Wassermolekülen absorbiert oder diffus gestreut werden. Manchmal sind aber gerade diese Zeiten mit erhöhter Erosion während eines solchen Ereignisses interessant (FISCHER et al. 2012A, STOCKER 2014). Ein Wechsel des Lasersystems hin zu kürzeren grünen Wellenlängen wie ihn KINZEL et al. (2007)

oder MCKEAN et al. (2008) einsetzen, wäre denkbar, bringt aber auch neue Herausforderungen mit sich, wie z. B. die Interpretation des zurückgesendeten Lasersignals (LEGLEITER 2012).

Je nach Trübungsgrad, Strömung und Sonneneinstrahlung kam es infolge der Aufnahmen am Wasser zu Spiegelungen an der Wasseroberfläche, die den Laserstrahl reflektierten und damit Teile oder ganze Strukturen in Form von Spiegelbildern erzeugten. Von ähnlichen Schwierigkeiten berichten ZIPPELT und CZERNY (2010). Dies erschwerte eine Auswertung von Strukturen im Fließgewässer, aber auch an den Ufern und ließ die Datenaufbereitung ausgesprochen zeitintensiv werden. Auch wenn über diverse Methoden (Filterung über Ebenen etc.) versucht wurde, möglichst viele der Wasserspiegelpunkte „halbautomatisch“ zu entfernen, mussten am Ende die Punktwolken doch noch überprüft und manuell beschnitten werden, um reale und „fiktive“ Punkte voneinander zu trennen. Auch das entspricht dem allgemeinen Vorgehen in der Literatur.

PFLEGERL (2008) untersuchte mit TLS (auch RIEGL LMS-Z420i) die Geometrie eines Wurzelstocks. Da die gewonnenen Daten für eine 3 D-Modellierung nicht ausreichten, wurde er anschließend mithilfe der Nahbereichsphotogrammetrie aufgenommen. Aber auch hier ist durch die Vielzahl und Vielgestalt der Wurzeln eine Orientierung kaum möglich und die Auswertung zeigte sich als besonders aufwändig. Ein zweiter Versuch – das Scannen einer Weide – war zwar möglich, aber für eine exakte Abbildung der Feinäste waren zu wenige Scanpunkte vorhanden. Ähnliche Probleme traten bei oben genanntem Wurzelstock auf. Durch die komplexe Wuchsform des Wurzelstocks kam es zu starkem Rauschen in der Punktwolke und einzelne Verästelungen waren nicht mehr nachvollziehbar.

Auch wenn dieser Test die in der Arbeit notwendige Anforderung an die Auflösung deutlich übersteigt, zeigt er einmal mehr die Problematik der Vegetationsstrukturen, die beim Scannen zwangsläufig mit aufgenommen werden.

Nach PROKOP und SINGER (2011) müssen zur Messungengenauigkeit noch die Fehler der Registrierung der Scans zueinander, der atmosphärische Fehler, sowie Fehler aus Filterung und Interpolation der Punktwolken addiert werden. Zusammen ergibt das nach den Autoren einen möglichen Höhenfehler von ± 15 cm. Der durchschnittliche Fehler der Messung wird aber bedeutend geringer sein (PROKOP & SINGER 2011). Dieser sehr hoch angesetzte Fehler wurde in der vorliegenden Arbeit im Vergleich relativ niedrig angesetzt, da außer dem LoD mit 1 cm, in dem bereits verschiedene Fehlerquellen mit berücksichtigt werden, keine weiteren Fehlerquellen berücksichtigt wurden.

Die TLS-Punktwolken der Geländeoberflächen wurden in 2,5 D ausgewertet. Bei komplexen Körpern funktioniert die 2,5 D-Auswertung jedoch nur noch mit Einschränkungen, da es Punkte mit denselben X-Y-Koordinaten, aber unterschiedlichen Z-Werten geben kann (Überhänge etc.). Die in dieser Arbeit eingesetzten Programme RiscanPro und SAGA GIS können nur eine 2,5 D-Vermaschung leisten. Für viele Fragestellungen, insbesondere bei der planaren Betrachtung, ist dies ausreichend, bei Überhängen allerdings ist mit entsprechenden Datenlücken zu rechnen.

Die Ergebnisse konnten am Rande ferner zeigen, dass natürliche Einschränkungen, die durch einen erhöhten Wasserstand, Vegetation oder andere Abschattungseffekte gegeben sind, wesentlich gewichtiger sind und das Ergebnis u. U. stärker beeinflussen können als Registrierungsfehler oder andere Messunsicherheiten, die bei sorgfältiger Nachbearbeitung immer im unteren cm-Bereich liegen.

Abschließend bleibt nach Ansicht des Verfassers (Geograph) immer die Frage nach dem Ziel der Untersuchung und welche Auflösung und Genauigkeit dafür tatsächlich benötigt wird. Aufgrund der in den letzten Jahren rasant gewachsenen Möglichkeiten, sowohl bei der Aufnahme, als auch bei der Weiterverarbeitung, wird es scheinbar immer einfacher, noch hochaufgelöstere Daten zu generieren und diese sogar noch zu verarbeiten. Allerdings ergeben sich streng genommen auch drei unterschiedliche Beschäftigungsfelder: zum einen mit der Methode oder dem Vermessungsgerät selbst (Vermessungstechnik), zum anderen eine möglichst optimierte Bearbeitung der erhobenen Daten (Software- und Programm-entwicklung) und zuletzt die Anwendung als „Mittel zum Zweck“, um daraus im Idealfall „schnell und einfach“ entsprechende Aussagen z. B. zu Oberflächenveränderungen treffen zu können. Diese zuletzt genannte „geographische“ Vorgehensweise wurde nach dem erarbeiteten Kenntnisstand in vorliegender Arbeit genutzt, um die Morphodynamik am Fließgewässer zu quantifizieren. Zugleich konnte eine rasante Weiterentwicklung rund um den Themenbereich TLS und die Bearbeitung von Daten während der Anfertigung der Arbeit beobachtet werden, von denen nicht mehr jede Neuerung mit einfließen konnte.

7.2.4.2. Untersuchungen an anderen Flüssen

Die ermittelten Umlagerungs- und Erosionsprozesse wurden jeweils auf die tatsächlich von Veränderung betroffene Fläche bezogen betrachtet. Zusätzlich erfolgte eine Umrechnung auf die Gesamtfläche, sowie eine grobe Umrechnung in Tonnen, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu gewährleisten. Die Umrechnung in Tonnen muss aufgrund verschiedener Gewichtsanteile des Materials als grobe Annäherung an das tatsächliche Gewicht verstanden werden.

Allein die Unterschiede im System OHB zeigen allerdings, dass auch bei den Ergebnissen des TLS eine nur eingeschränkte Vergleichbarkeit mit anderen Standorten, Studien oder Flüssen möglich ist. Nach NEWSON (1980), BAKER (1994), MAGILLIGAN et al. (1998) und PHILLIPS (2002) sind allgemein Faktoren, die zur morphologischen Veränderung führen, von Fluss zu Fluss unterschiedlich. Obwohl am gleichen Fluss, oft am gleichen Tag und mit der gleichen Methodik (Scanner, Einstellungen, Vorgehen etc.) gearbeitet wurde, können die Standorte zwar verglichen werden, zeigen aber eine sehr große Spannweite in ihrem Entwicklungsverhalten und eine allgemeingültige Aussage kann es folglich nicht geben.

Ohne eine genaue Bestimmung und Kenntnis der jeweiligen Einflussfaktoren und Abflussbedingungen lassen sich die Ergebnisse nur auf qualitativer Prozessebene diskutieren.

SCHERLE (1999) gibt zu Bedenken, dass bei einem Vergleich verschiedener Gewässer oder auch Gewässerabschnitte eines FG die mittlere Erosionsrate beachtet werden sollte, da, wie gezeigt werden konnte (siehe Kapitel 6.2.3), die Erosionsrate von Querschnitt zu Querschnitt stark variieren kann. Nach Ansicht des Verfassers hängt dies im Wesentlichen allerdings von der Fragestellung und dem zu betrachtenden Maßstab ab. Insbesondere bei windungsreichen Abschnitten ist es selbstverständlich, dass am Prallhang in der Krümmung die Erosionsraten erheblich höher sind als an den Krümmungswendepunkten. Hilfreich wäre es daher, Zonen unterschiedlicher morphodynamischer Aktivität zu differenzieren.

BRICE (1984 in SCHERLE 1999) schlägt deswegen auch die Zuordnung zu Flusstypen vor und SCHERLE (1999) ergänzt, dass unabhängig von der Laufform auch das Ufermaterial mit einzubeziehen ist. Auch KALE und HIRE (2004) sind der Ansicht, dass hochwasserbasierte geomorphologische Veränderungen der Gerinneform nicht als isolierte, naturräumliche Phänomene zu betrachten sind, sondern abhängig von einer Vielzahl von Faktoren und Kombinationsmöglichkeiten die Morphologie des Gewässers verändern. Nach KALE und HIRE (2004) liegt die Lösung in nach Faktoren getrennten Untersuchungen, da nur über das Verständnis einzelner Auslösefaktoren ganzheitliche Auswirkungen abzuleiten sind.

Ausgewählte Ergebnisse einiger Arbeiten sollen dennoch helfen, die Ergebnisse der hier getätigten Untersuchung etwas einordnen zu können.

HÄMMERLE et al. (2013) erstellten mithilfe eines TLS ein DGM (0,25 m Auflösung) einer Kiesbank in der Altneckarschleife. Nach der Entfernung von Vegetations- und Wasseroberflächenpunkten in allen Datensätzen konnte über die Analyse des Differenzmodelles eine Gesamterosion infolge von Hochwasserereignissen von 660 m³ berechnet werden. Dies entspricht etwa einem durchschnittlichen Höhenverlust von 14 cm. Bei den hier vorliegenden Untersuchungen wurden Kiesbänke um den gleichen Betrag oder höher in wenigen Tagen aufgebaut. Eine Erosion an Bänken oder Inseln konnte bisher nicht nachgewiesen werden.

KASVI et al. (2013) führten TLS-Messungen vor und nach einem Hochwasser am Gleithang eines sandgeprägten Baches durch. In Kombination mit einem ADCP konnten sie während geringer Abflüsse eine Ablagerung am Anfang des Gleithanges feststellen und mit Zunahme der Fließgeschwindigkeit sukzessive eine Verlagerung über die Seite zum Scheitel an der höchsten Stelle beobachten. Diese Erfahrungen lassen sich gut auf die Kiesuferbänke an der „1. Rückleitung-Fließstrecke“ übertragen.

STAREK et al. (2013) haben bei ihren Untersuchungen (9 Aufnahmen) über 18 Monate einen 11,5 Meter breiten und 3,2 Meter hohen Prallhang untersucht und kommen auch zu dem Ergebnis, dass die Veränderung, auf die betrachtete Fläche bezogen, räumlich und zeitlich stark variiert und zusammengenommen etwa einen Betrag von 12,1 m³ ausmacht.

An einem etwas kleineren sandgeprägten Fluss wurden 13 m einer Außenkurve mit Höhen zwischen 0,8 m und 1,3 m von NASERMOADDELI und PASCHE (2008) mit TLS und einem

Echolot untersucht. Hier betrug die Rückverlagerung in einem Zeitraum von 7 Monaten zwischen 0,016 m und 0,153 m. Das Maximum an Erosionsvolumen nach bordvollem Abfluss lag bei 2,4 m³.

Erosionsraten lateraler Erosion nennt auch SCHERLE (1999), allerdings erfolgt die Abschätzung anhand von Querprofilen oder anhand von Überresten der beim Ausbau hergestellten Ufersicherungen. Die Erosion war infolge eines Hochwassers stärker als in den 26 Jahren davor. Neben diesem Ereignis mit 2 m lateraler Erosion was auch der Rückverlagerung am Standort der „1. Rückleitung“ am OHB während einer Flutung entspricht, wurden Erosionsraten zwischen 0,013 m und 0,05 m im Jahr festgestellt, die wiederum auch an der „1. Rückleitung“ oder anderen Standorten gemessen werden konnten. Die Entwicklungszeiträume lagen in der Studie von SCHERLE (1999) zwischen 25 und 85 Jahren. RESOP und HESSION (2010) vergleichen die Vermessung von Querprofilen mittels einer Totalstation mit denen von TLS-Messungen. Dabei können über den 11 Meter langen Uferbereich Volumenänderungen (Erosion) zwischen 1,6 m³/Jahr und 2,1 m³/Jahr festgestellt werden. Bei Standorten in den Donauauen können solche Beträge während einer Flutung innerhalb eines Tages abgetragen werden. Für die Hangrückverlagerung wird in der Untersuchung von RESOP und HESSION (2010) ein Betrag zwischen 0 und 0,17 m für verschiedene Zeiträume genannt, dieser liegt damit unter der Rückverlagerungsrate im UG.

Erosionsraten in Abhängigkeit vom Einzugsgebiet haben bereits auch ZELLER (1967), HOOKE (1980) und BRICE (1984) untersucht, diese können mit dem im UG erhobenen Daten allerdings nur schlecht verglichen werden (vgl. oben), zeigen aber eine deutlich geringere Lateralerosion. Erosionsraten auch bei gleicher Einzugsgebietsgröße streuen stark, und auch entlang eines FG ist mit Streuung zu rechnen, da sich nicht nur der Abfluss, sondern auch das Ufermaterial verändern. Klar ist, dass bei der Höhe der Erosionsrate die Häufigkeit erosiver Abflüsse eine wesentliche Rolle spielt (HOOKE 1980). Damit müssen die Erosionsraten neben anderen Faktoren immer in Bezug zu den Hochwasserabflüssen, die während des Untersuchungszeitraumes stattgefunden haben, gesetzt werden.

7.2.4.3. Unterschiede zwischen den Aufnahmen und den Standorten der eigenen Messung

Zur Untersuchung von morphologischen Prozessen wurden verschiedene Standorte entlang des neuen Fließgewässers ausgewählt (Kapitel 4.3). Zum einen wurden Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Aufnahmen (zum Teil Ereignisbezogen) betrachtet, zum anderen wurde auch die Veränderung von der ersten zur letzten Aufnahme gezeigt. Diese Gesamtveränderung über die Beobachtungsperiode entspricht allerdings nicht der Summe der Einzelaufnahmen.

Bereiche mit Erosion werden zum Teil durch bestimmte Versagensprozesse (Spaltenbildung, Verkipfung etc.) und durch Vegetationszuwachs zwischen den einzelnen Aufnahmen wieder ausgeglichen. Oder umgekehrt, erfahren Bereiche mit Ablagerung durch kurzzeitig wirkende Erosionsprozesse eine Oberflächenerniedrigung, bevor sie dann verfüllt oder durch erneute

Ablagerung wieder aufgebaut werden. Es kann deshalb grundsätzlich von größeren Veränderungen ausgegangen werden, als wie sie durch die eingesetzte Methode zwischen zwei Aufnahmetermenen detektiert wurden. Die Aufnahme ist immer auf einen Moment beschränkt und Änderungen werden als Differenzen von temporären Zuständen ermittelt.

Zusätzlich kann für oben genannte Unterschiede auch das gewählte LoD in Kombination mit der Oberflächenveränderung eine Rolle spielen (UMSTÄDTER 2015). Während es zu geringen Veränderungen innerhalb eines kurzen Zeitabschnitts kommen kann, die knapp unterhalb des LoD liegen und damit nicht in die detektierbare Veränderung mit eingehen, können diese Bereiche geringer Veränderung in einem größeren Zeitraum oberhalb des LoD liegen und dann als „richtige“ Veränderung gemessen werden, weshalb die Summe der Veränderungen innerhalb der einzelnen Abschnitte dann geringer ist als die gemessene Veränderung zwischen der ersten und der letzten Aufnahme.

„Trogbrücke“ und „Wegekreuzung-Sedimentzunge“

Bei der Auswertung der Momentaufnahmen einzelner Standorte konnten verschiedene Prozesse und Formen beschrieben werden, die die Summe von verschiedensten Einflussfaktoren darstellen.

Die beiden planar betrachteten Standorte (Abb. 4-18 u. 4-20) sollen hier zusammengefasst werden. Die Gemeinsamkeit der Standorte beschränkt sich auf die Sedimentverfügbarkeit am Standort. Die Feststoffverfügbarkeit wirkt bei beiden Standorten als Minimumfaktor – jedoch ganz unterschiedlich. Während bei der „Trogbrücke“ eine klare Erosionslinie an den Ufern zu erkennen ist, die direkt mit den Abflussverhältnissen in Verbindung gebracht werden konnte, kann nach der Bildung von diversen Bankstrukturen und ausbleibender Materialnachlieferung nur noch eine deutlich reduzierte morphologische Aktivität im gesamten Abschnitt gemessen werden.

Bei der zunächst kontinuierlich wachsenden Akkumulationsform in Gestalt einer Sedimentzunge an der „Wegekreuzung“ hat sich nach etwa zwei Jahren der Zuwachs eingestellt. Solange Material aus der Furt als Sedimentspeicher nachgeliefert werden konnte, blieb der Wachstumstrend erhalten.

„Radbrücke Prallhang1“ und „Prallhang am Querprofil 17 bis 20“

An den beiden Prallufeln (Abb. 4-19 u. 4-21) lassen sich gut die Unterschiede aufgrund verschiedener Materialzusammensetzung aufzeigen. Während es beim Prallhang an der „Radbrücke“ schon vor der Wassereinleitung zu Abbrüchen an der ausgebildeten Prallhangwand kam (mit zwischenlagernden Kies- und Sandschichten), blieb der weitgehend im Auelehm ausgebildete Standort („PH am Querprofil 17 bis 20“) über acht Monate stabil, bevor deutlich Veränderungen detektiert werden konnten. Hangunterschneidung durch Strömungserosion führte bei beiden Standorten zur Ausbildung von Überhängen und einer Hohlkehle im oberen Böschungsbereich. Beim 4. Standort, bei den Querprofilen, konnte über die TLS-Punktwolke während einer Aufnahme zu niedrigen Wasserständen eine Erosionsrille

im unteren Bereich (unter der Mittelwasserlinie) festgestellt werden (Anhang 6.2-6). Inwieweit solche an stabile Lehmschichten gebundene Formen mit über längere Zeit konstanten Wasserspiegellagen bzw. Durchflüssen zusammenhängen, muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

„Wetterloch“

An dem ehemals durch rückschreitende Erosion entstandenen Bereich (Abb. 4-22) kam es, wie schon erwähnt, auch vor der Wassereinleitung zu Abbrüchen an den senkrecht ausgebildeten Uferwänden. Nach den anfangs erhöhten Erosionsraten stellte sich nach Aufweitung der Engstelle eine den Abflüssen angepasste Breite ein. Nach etwa 17 Wochen Formung unter normalen Abflussbedingungen war die „aktive“ Phase morphologischer Veränderung bereits abgeschlossen. Bei einer ÖF kommt es mit steigendem Abfluss relativ schnell zum Überströmen der tiefer liegenden Fläche und raschen Verbreiterung des Fließquerschnitts. Entsprechend reduziert sich die Schubspannung an Gewässersohle und Ufern.

„1. Rückleitung-Fließgewässerstrecke und Prallhang“

An der Fließgewässerstrecke der „1. Rückleitung“ (Abb. 4-24) beschränkt sich die laterale Erosion nicht nur auf das Prallufer, sondern findet an beiden Ufern statt (Abb. 6.2-46). Diese auf beide Ufer ausgeweitete Erosion deutet nach SCHERLE (1999) auf eine zu große Morphodynamik am Fließgewässer hin, die auch als Defizit bei Renaturierungsvorhaben gesehen werden kann. Dennoch haben sich hier typische Sohlstrukturen ganz nach den Vorstellungen von KELLERHALS (1967) entwickelt, wie die Diamantbank kurz nach der Brücke (Punkt I in Abb. 6.2-46), die aus einer Mittenbank entstanden ist und sich weiter zur Insel entwickelt hat. Durch die Aufspaltung der Strömung wurde zusätzlich die Breitenerosion gefördert. Auch eine Riffle-Bildung konnte in den umlaufenden Rinnen festgestellt werden. Bei der Entwicklung darf allerdings nicht außer Acht gelassen werden, dass es aufgrund der Nähe zur Brücke und der Steinsicherung zu einer „Bauwerk-induzierten“ Bildung der Sohlform gekommen ist. Weiter flussabwärts befindet sich die Krümmungsbank, die aus dem Material der davor liegenden, von Breitenerosion betroffenen Uferbereiche besteht (Punkt II in Abb. 6.2-46). Die Veränderungen an den Kiesbänken erfolgen in erster Linie bei Ereignissen mit höheren Abflüssen, wie es von unterschiedlichen Autoren beschrieben wird. Im Untersuchungsgebiet werden solche Abflüsse in erster Linie durch ÖF erreicht.

Ein bisher nicht angesprochener Punkt bleibt das Material am Standort. Auch wenn hier die „richtigen Prozesse“ ablaufen, wird trotzdem nicht das natürliche Material erodiert und umgelagert, sondern nur eine Mischung aus Wasserbausteinen, Material aus dem Wegebau und Ausgangssubstrat. Vereinfachend ist festzustellen, dass auch mit stellenweiser Behinderung durch Bauwerke und Uferbefestigungen die Vielfalt an unterschiedlichen Strukturen zunimmt.

Nach den Versuchen von FRIEDKIN (1945 in SCHERLE 1999) wird Material, welches am Prallufer erodiert wird, vorwiegend nur bis zum nächstgelegenen Gleitufer auf der gleichen Flusseite transportiert und hier abgelagert (vgl. KASVI et al. 2013). Interessant sind auch Modellversuche, welche mit unterschiedlich großen Abflüssen durchgeführt wurden. Bei kleinen Abflüssen lag der Punkt des größten Strömungsangriffs am Außenufer, und hier am Anfang der Krümmung, und verlagerte sich mit steigenden Abflüssen über den mittleren Teil bis zum unteren Teil der Krümmung.

Bezogen auf den Prallhang an der „1. Rückleitung“ (Abb. 4-23 u. 6.2-43) bedeutet dies, dass vielleicht gerade die Abflüsse, die hier meist weit unter dem bordvollen Abfluss liegen, besonders die laterale Ufererosion fördern, da die Strömung bei diesen Abflussverhältnissen im mittleren Bereich (180°) der Krümmung liegt (Abb. 6.2-43).

Abschließend bleibt festzuhalten, dass im Fall naturnah angelegter FG die morphologische Aktivität infolge veränderter Abflüsse (gesteuert oder nicht) von großer Bedeutung für aquatische und ans Wasser gebundene Organismen ist, da durch das Auftreten morphodynamischer Prozesse neue Habitate hergestellt werden können. Diese können auch mit ortsfremden Materialien gebildet werden und erhöhen u.U. zusätzlich die Strukturvielfalt.

Für die in dieser Arbeit näher betrachteten sechs Standorte lassen sich die eingangs erwähnten Faktoren wie Dynamik der Abflüsse, Gerinnegeometrie und Materialzusammensetzung der Ufer, Anteil und Menge der transportierten Feststoffe, Vegetation und Totholz sowie anthropogene Faktoren in der momentan ausgebildeten Morphologie in jeweils individueller Ausprägung wiederfinden.

Aus morphologischer Sicht sind niedrige Wasserstände auch nicht unbedeutend, da es sowohl auf den Bänken und trockengefallenen Gleituferebereichen als auch an den der Sonne ausgesetzten Prallhängen schnell zur Austrocknung und Lockerung des Substrats kommt. Infolge von Temperaturschwankungen und Änderungen in der Bodenfeuchte führen Schrumpfung und Quellung zur Instabilität des Ufers. Diese als ‚sub-aerial weakening‘ oder ‚weathering‘ angesprochene Aufbereitung des Materials ist als vorbereitender ‚preparatory process‘ für die direkte Strömungserosion zu sehen (THORNE 1982, COUPER & MADDOCK 2001). Es konnten vom Verfasser auch nach längeren Trockenperioden Risse und Spalten beobachtet werden, die erhöhte Erosionsprozesse nach sich ziehen. Insbesondere nach einer plötzlichen Erhöhung der Abflussmengen ist mit erhöhten Umlagerungsprozessen auf der Gewässersohle, aber auch an den Uferbereichen zu rechnen. Geschiebemessungen, die nach solchen Abflusserhöhungen durchgeführt worden sind, belegen dies (FISCHER & CYFFKA in press).

Noch bedeutender scheinen Frosteinwirkung oder Frostwechselprozesse gerade in bindigem Material zu sein (LEOPOLD et al. 1964, LAWLER 1986, LAWLER 1993). Durch besondere Verhältnisse im März 2012 konnten besonders hohe Erosionsprozesse über die ganze Fließgewässerstrecke beobachtet werden (Abb. 7-4). Aufgrund einer ÖF und der extrem niedrigen Temperaturen kam es zum Festfrieren der Eisschollen am Ufer. Mit dem

Sinken der Wasserstände kippten die Eisschollen in die Mitte und rissen an ihnen festgefrorenes Material aus dem Uferverbund (vertikale Eiskräfte). Auch wenn solche Ereignisse durch Eislast und Eisstoß seltener Natur sind, tragen sie zu ungewöhnlich viel Erosion bei, da meist weite Strecken betroffen sein dürften. Diese spezielle Form scheint ein bisher kaum beachteter Erosionsprozess zu sein, was mit der schwierigen Erfassung zusammenhängen dürfte. Auch am OHB konnte aufgrund der niedrigen Temperaturen (und der Grenzen der Betriebstemperatur des TLS) keine Quantifizierung erfolgen.



Abb. 7-4: Erosion durch vertikale Eislasten nach fallendem Wasserspiegel am OHB (Foto: Peter Fischer 2012).

7.3 Der dynamische Methodenmix auf dem Prüfstand

Für ein sich so schnell veränderndes System scheint der Einsatz von terrestrischem Laserscanning als schnelle und gleichzeitig hochauflösende Methode zur Detektion von Oberflächenveränderungen prädestiniert. Andererseits wurde an mehreren Stellen in der Arbeit auf die Probleme, die sich im Zusammenhang mit dem Einsatz von TLS an Gewässern ergeben, hingewiesen.

Der Faktor Zeit ist für den gesamten Bearbeitungsprozess, von der Datenaufnahme bis hin zur Datenbearbeitung und -auswertung, sehr entscheidend. Beim Laserscanning erreicht je nach Autor und Aufgabenstellung das Verhältnis von Messdauer zu Datenverarbeitung schnell einen Faktor von 1:5 bis 1:15 (MARBS 2003, SOMMER & KERSTEN 2007) oder höher (PETERSEN 2006 in PFLEGERL 2008). Nach PFLEGERL (2008) ist dieser Faktor dafür ausschlaggebend, dass viele Ingenieurbüros zwar die Scanaufnahmen durchführen und die Punktwolken noch bereinigen, diese aber dann dem Kunden ohne Modellierung oder Datenauswertung verkaufen.

Mit dem im Kapitel 5.2.4.2 vorgestellten „Workflow“ und den vorbereitenden Arbeiten kann etwa 1 Std. pro Scanposition angesetzt werden. Damit ergibt sich eine Scan-Zeit von 163 Stunden für die in dieser Arbeit vorgestellten morphodynamischen Hotspots. Multipliziert mit der (zugegeben sehr hoch angesetzten) Zeit für die Datenweiterverarbeitung, kommt man auf deutlich über 1 Jahr Bearbeitungszeit allein für die TLS-Aufnahmen. Berücksichtigt man allerdings weitere zur Analyse und Interpretation notwendige Arbeiten, die sich daran anschließen, ist ein Jahr wiederum durchaus plausibel. Allerdings sind die Anwendungsmöglichkeiten nahezu unbegrenzt.

Abschließend lässt sich klar feststellen, dass das TLS sehr gut für die vielfältigen Fragestellungen an FG eingesetzt werden kann, insbesondere auch für die Bestimmung und Quantifizierung von morphologischen Veränderungen. Besonders gut funktioniert die Methode bei neu angelegten naturnahen FG, da zum einen die komplexe Morphologie über eine detaillierte Abbildung der Oberflächen entsprechend berücksichtigt werden kann, zum anderen kommt es aufgrund fehlender Vegetation kaum zu Abschattungen. Dieser Vorteil gegenüber natürlichen FG nimmt mit entsprechender „Alterung“ ab, und durch aufkommende Pioniervegetation sinkt zwar nicht die Anwendungsmöglichkeit, aber die Weiterverarbeitung der Rohdaten wird immer zeitintensiver. Meist reduziert sich auch dadurch die Fläche, die mit dem Scanner erfasst werden kann. Hinzu kommt, dass die Scanstandorte dann entsprechend „gepflegt“ werden müssen.

Durch die Erstellung von DGM in unterschiedlicher Auflösung lassen sich verschiedene Fragestellungen bearbeiten und weitere fluvial-morphologische Größen ableiten, die zur Analyse notwendig sind. Je nach Bedarf kann eine Ergänzung über Photogrammetrie – vom Boden oder aus der Luft – erfolgen.

Trotzdem bleiben (zumindest bei dem eingesetzten Laserscanner) die Unterwasserbereiche unberücksichtigt. Hierfür hat sich die altbewährte Methode der Querprofilvermessung bewährt, die je nach UG und FG theoretisch auch mit dGPS oder Echolotsystemen durchgeführt werden kann. In den Donauauen ist das Nivellier und die Messlatte allen anderen Methoden vorzuziehen.

Für die Erfassung der Überflutungsflächen hat sich die Kartierung mit dGPS gegenüber anderen Verfahren als beste Lösung erwiesen.

Das mobile Pegelnetzwerk – für die ereignisabhängige Erfassung während ÖF – hat insbesondere mit den automatischen Loggern (Drucksonden) gegenüber den individuell abzulesenden Messlatten uneingeschränkte Vorteile. Beide haben sich aber für die

Erfassung der Wasserstände in unterschiedlichsten Auengewässern bewährt. Für die permanente Aufzeichnung von Wasserstandsdaten wurden Pegel an Brückenbauwerken gesetzt.

Wie schon diskutiert (siehe Kapitel 5.1.1.2), hat die Durchflussmessung mit dem magnetisch-induktiven Verfahren nicht ausgereicht, um zufriedenstellende Durchflussinformationen zu erhalten.

Der Mix aus Geräten und Methoden hat sich als besonders hilfreich erwiesen, um der Komplexität des Systems und der wechselseitigen Prozesse gerecht zu werden. Zum Beispiel gibt es Bereiche, die immer überflutet sind, woraus sich die Notwendigkeit der angeführten Methodenkombination ergibt.

Neben der Verfügbarkeit der Geräte und der Methodenkompetenz muss auch eine gewisse Flexibilität vorhanden sein, Messungen zielgerichtet und zum optimalen Zeitpunkt durchführen zu können. Hierzu gehören auch umfangreiche Kenntnisse über das UG, die über den Einsatz (Zeit und Ort) der jeweiligen Methoden entscheiden.

Ziel war es nicht, nur einen Prozess an einem Standort zu erfassen und zu beschreiben, sondern vielmehr die Gesamtentwicklung des neuen FG zu verfolgen. Damit ergibt sich eine große Spannweite, angefangen von einer relativ kleinen Betrachtungsebene mit hoher Dynamik und häufigen Messungen (wie am Prallhang der „1. Rückleitung“) bis hin zur Ausbreitung der Überflutungsflächen, die sich über das ganze UG erstrecken.

Gerade weil in Naturversuchen die festzustellenden Veränderungen nicht eindeutig auf die eine Ursache zurückgeführt werden können, ist es nötig, möglichst viele Einflussfaktoren zu erfassen. In so groß angelegten „Experimenten“ ist der Aufbau eines fundierten und umfassenden Basisdatensatzes entscheidend, was nur mit einer entsprechend großen Vielfalt an Methoden erreicht werden kann. Davon ausgehend kann dann einzelnen Faktoren nachgespürt werden.

8. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

8.1 Bemerkungen zu den Dynamisierungsmaßnahmen und einzelnen Ökofaktoren

Naturnahe Umgestaltungen mit einem kostengünstigen Gewässerunterhalt können durch die Anlage naturnaher, unter Beachtung empirischer Gesetzmäßigkeiten konstruierter Gerinne realisiert werden. Wie steht es aber um die Förderung der eigendynamischen Entwicklung und der Dynamisierung von Auen?

Die am Anfang im Kapitel 3.1 aufgeworfenen Fragen sollen nun noch einmal aufgegriffen bzw. auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse beantwortet werden.

Antworten auf die projektspezifischen Fragen:

- Die Ausleitungsmengen, insbesondere bei Ökologischen Flutungen, führen nicht zum prognostizierten Zustand. Die Überflutungsflächen bei ÖF breiten sich nicht wie geplant aus. Die Dotation des UG_{Gew} ist mit 1% des Donauabflusses als sehr gering einzustufen. Ein Ziel der Renaturierung, die Durchgängigkeit für aquatische Organismen wiederherzustellen, konnte aber mit den bisher ausgeleiteten Wassermengen erreicht werden. Allerdings scheint nach bisherigem Kenntnisstand die Steuerung den Anforderungen einer Dynamisierung nicht zu entsprechen, da Häufigkeit, Dauer und Intensität der ÖF nicht ausreichen, um auch morphologische Umlagerungsprozesse über das Flussbett des OHB hinaus zu initiieren. Eine erste Verbesserung durch eine dynamisierte Abflusssteuerung, sowohl für die Dotation von OHB, als auch der ÖF, konnte in Abstimmung mit dem WWA Ingolstadt erreicht werden.
- Aussagen zu Strömungsverhältnissen und Fließzeiten konnten für einige Standorte getroffen und Fließrichtungen zu unterschiedlichen Szenarien für das PG in Karten visualisiert werden. Unterschiede zwischen natürlichen und gesteuerten Flutungen wurden aufgezeigt. Dabei erfolgte auch eine Beurteilung der Rückstauprozesse, welche die hydrologischen Verhältnisse in den Donauauen maßgeblich mit beeinflussen.
- Die beschriebene Dynamisierungsmaßnahme
 - a) Das Umgehungsgewässer führt zu den naturschutzfachlich erwünschten und (bezüglich der eigendynamischen Entwicklung) erwarteten Veränderungen. Dabei lassen sich entlang des 8,4 km langen FG verschiedenste Standorte ausweisen. Diese reichen von gänzlich unveränderten Standorten oder anthropogen veränderten, eher statischen Bereichen bis zu hochdynamischen, stark bis sehr stark veränderten Standorten, welche die eigendynamische Entwicklung repräsentieren.
 - (b) Die Ökologische Flutung bringt an den von ihr erreichten Flächen auch eine autotypische oder eine auenähnliche Veränderung in den Wasserständen. Da, wie bereits ausgeführt, zahlreiche Einschränkungen gegenüber natürlichen, ungesteuerten Hochwasserereignissen bestehen, können ÖF die morphologisch-sedimentologischen Prozesse von natürlichen

Hochwassern, insbesondere an nicht staugeregelten Flüssen nicht ersetzen. Damit können auch keine neuen aquatischen und semi-terrestrischen Lebensräume innerhalb der Aue entstehen.

Antworten auf die allgemeinen, hydrologischen und fluvial-morphologischen Fragen

- Auch in künstlich angelegten Gerinnen – wie naturnahen Umgebungsgräben – bestehen Wechselwirkungen zwischen dem Abfluss und der Gerinneform. Dabei spielt, wie in natürlichen FG, der bettbildende Abfluss (in dieser Arbeit auch mit dem bordvollen Abfluss gleichgesetzt) die entscheidende Rolle. Allerdings führen auch niedrige Abflussmengen an Engstellen und wenig verfestigten Ufern zu erosiven Prozessen.
- An manchen Standorten laufen die Prozesse schneller als in natürlichen Systemen ab.
- Ein Zusammenhang zwischen Form und Materialtransport lässt sich besonders gut an den neu entstandenen Kiesbänken erkennen, die sich teilweise aus ortsfremdem Material zusammensetzen. Während dies die Strukturvielfalt erhöht, führt an manchen Standorten ein sich andeutendes Geschiebedefizit zu statischen Zuständen. Die Lebensdauer von Strukturen ist so unterschiedlich wie die Vielfalt der materialabhängigen Formen, die sich bilden können. Manche werden direkt nach ihrer Entstehung schon wieder zerstört, manche überdauern auch mehrere Flutungsereignisse.
- Die fehlende Überflutungsdynamik kann, wie bereits oben ausgeführt, nicht wieder hergestellt werden.
- Eine systematische Erfassung der Gerinnemorphometrie mittels TLS erfolgte durch die Erstaufnahme des Gerinnes. Damit wurde ein wertvoller Basisdatensatz für verschiedene Analysemöglichkeiten geschaffen. Einige davon wurden aufgezeigt.

Über die Ausprägung der repräsentativen Ökofaktoren aus Kapitel 3.2 kann abschließend eine Einschätzung der hydrologischen und morphologischen Verhältnisse erfolgen, die mit den Dynamisierungsmaßnahmen erreicht wurden (Tab 8-1).

Tab. 8-1: Hydrologischer und gewässermorphologischer Funktionskomplex (FK) sowie Teilkomplexe (TK) eines gewässerökologischen Zielsystems nach DVWK Merkblattentwurf (1996 in SCHERLE 1999, vgl. Tab. 3-1). Die in der Arbeit behandelten Faktoren sind hervorgehoben und wurden mit einer Bemerkung ergänzt.

Teil A (Hydrologie)

FK	TK	Repräsentative Ökofaktoren	Bemerkung
H Y D R O L O G I E	Abfluss	jahreszeitliche Abflussverteilung	Die Orientierung erfolgt am Abflussregime der Donau. Für ökologische Belange sollte eine individuell angepasste Steuerung während niedriger Wasserführung erfolgen. Eine zusätzliche Dynamisierung der Wasserstände wäre wünschenswert.
		tägliche Abflussverteilung	Durch zweimaliges Abgreifen des aktuellen Durchflusswertes im Oberwasser der Staustufe Bergheim scheint die tägliche Abflussverteilung ausreichend optimiert.
		Abflussmenge	Abflussmengen liegen im Mittel unter 1%, auch bei Hochwasser scheint mit fixierter und oberster Grenze von 5% (mit steigenden Abflüssen weniger) keine optimale Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Wassermengen gegeben.
		Wasserstands-Abfluss-Beziehung	Diese konnte nicht zufriedenstellend ermittelt werden.
		mittl. Fließgeschwindigkeit	Die Werte liegen im gängigen Schwankungsbereich, bei 0,5 m/s (max. 3,8 m/s).
		mittl. Sohlschubspannung	k. A.
		Schwebstoffführung	k. A.
		Geschiebetransport	k. A.
	Überflutung	Überflutungshäufigkeit	Die Häufigkeit ist mit 2-3 mal im Jahr als gering einzustufen.
		Überflutungshöhe	Aufgrund der standörtlichen Unterschiede ist der Überstau sehr variabel, insgesamt aber als zu niedrig zu bewerten.
		Überflutungsdauer	Auch hier variieren die Zeitangaben an den verschiedenen Standorten erheblich. Die Überflutungsdauer ist immer kürzer als die Dauer einer ÖF und meist nur 2-3 Tage.
		Überflutungsfläche	Insgesamt als zu gering zu bewerten (auch geplante Ausdehnung betrifft nur fließgewässernahe Bereiche). Die prognostizierten Flächen werden nicht erreicht.
	Grundwasser	mittl. Flurabstand	k. A.
		Grundwasserschwankungsbereich	k. A.
		zeitl. Verlauf der Grundwasserstände	k. A.
		Korrelation Fluss- mit Grundwasserstand	k. A.

Teil B (Gewässermorphologie)

FK	TK	Repräsentative Ökofaktoren	Bemerkung
G E W Ä S S E R M O R P H O L O G I E	Linien- führ- ung	Windungsgrad	Die Sinuosität liegt zwischen 1,05 und 1,66.
		Laufamplitude	Für den OHB eigtl. zu groß, da er alte Donaunebenarme nutzt.
		Sohlgefälle	Das Gefälle beträgt zwischen 0,05% bis 1,7%, mittleres Gefälle 0,08%.
		Tiefen- u, Breitenvariabilität	Große Breiten- und Tiefenvariabilität: B/T-Verhältnis liegt für maximale Tiefen zwischen 4,4 zu 20,0 für das bordvolle Niveau, zwischen 4,5 und 40,7 für den mittleren Wasserspiegel.
		mittl. Gewässertiefe u. -breite	Tiefenvariabilität: zwischen 0,35 m und 2,11 m; Breitenvariabilität: zwischen 9,5 m und 29 m für das bordvolle Niveau, 0,16 m und 1,19 m (Tiefe) sowie 4,75 m und 18,82 m (Breite) für den mittleren Wasserspiegel.
	Sohle	horizontaler Sohlenaufbau/Choriotopverteilung	k.A.
		vertikaler Sohlenaufbau/ Korngrößenverteilung	k. A.
		Bänke	In den morphodynamisch aktiven Gerinnestrecken lassen sich diverse Bankbildungen beobachten.
		Furten/Kolke	Entwicklung und Veränderung über den untersuchten Flussabschnitt. Die ermittelte Abfolge von Riffles und Pools entspricht nicht der oft in der Lit. angegebenen 5- bis 7-fachen Breite.
	Ufer	Uferform	Anpassung an die gegenwärtigen Abflussverhältnisse und Überprägung der naturnah gestalteten Strukturen.
		Vertikaler Uferaufbau/Korngrößenverteilung	k. A.
		Ufervegetation	Teilweise über die Gewässerstrukturkartierung mit erfasst, insbesondere ist Totholz hydrologisch und morphologisch wirksam.
	Aue	Ausdehnung	Geringe Ausdehnung der Aue durch Eintiefung und begrenzende Damm- und Deichbauten. Eine Ergänzung erfolgt durch eine sich entwickelnde Sekundäraue auf tieferem Niveau der rezenten Donauaue.
		Strukturelemente	Über Gewässerstrukturkartierung teilweise über die „instream structures“ erfasst.
		Vernetzung	Wesentliche Verbesserung im Vergleich zum Ausgangszustand, allerdings immer noch weitgehend entkoppelt.

8.2 Schlussfolgerungen

„Ein aus auenökologischer Perspektive optimales Abflussregime (Zeitpunkt, Dauer, Häufigkeit und Intensität) ist dann erreicht, wenn [durch dessen Steuerung] ‚Möglichkeiten‘ geschaffen werden, dass auentypische Arten sich dauerhaft ansiedeln können und es letztendlich auch tun.“ (FISCHER & CYFFKA 2014, S. 91)

Um dieses durchaus ambitionierte Ziel auch in unserer dicht besiedelten Kulturlandschaft nur annähernd zu erreichen, bedarf es einiger (auch gesetzlicher) Änderungen und Anstrengungen auf Seiten der Behörden, Planungsbüros, Wasserbauer, natürlich auch von den Wissenschaftlern der verschiedenen Disziplinen, sowie eines großzügigen Entgegenkommens von Landeigentümern und zuletzt auch eines Umdenkens der Bevölkerung, wenn nicht sogar eines Wertewandels.

Ein Großteil davon wurde im Dynamisierungsprojekt der Donauauen bereits verwirklicht, dennoch sind weitere Anstrengungen nötig, wenn man „wirklich renaturieren will“.

Natürlich kann es nicht um die Wiederherstellung von Natur – Renaturierung hier dann im engeren Sinne verstanden – gehen. Auch bei den bayerischen Donauauen, wie bei vielen anderen Auenlandschaften Mitteleuropas, handelt es sich um ein vom Menschen überprägtes, verändertes und gestaltetes System, welches im Sinne von TOCKNER et al. (2011) auch passend als „domestiziertes Ökosystem“ bezeichnet werden kann. Damit aber auch ein künftiges gutes Zusammenleben in unserem gemeinsamen „Haus“ möglich wird, sollten wir dennoch handeln und den Gedanken von REY (2004) aufgreifen und somit dem „Patient Flussaue (Gewässersystem)“ zu einer gesunden Alterung verhelfen (Abb. 7-1). Der OHB, als Teil der Aue, befindet sich nach der „Therapie“ oder Entwicklungsmaßnahme (Dynamisierungsmaßnahmen) auf dem Weg der Genesung.

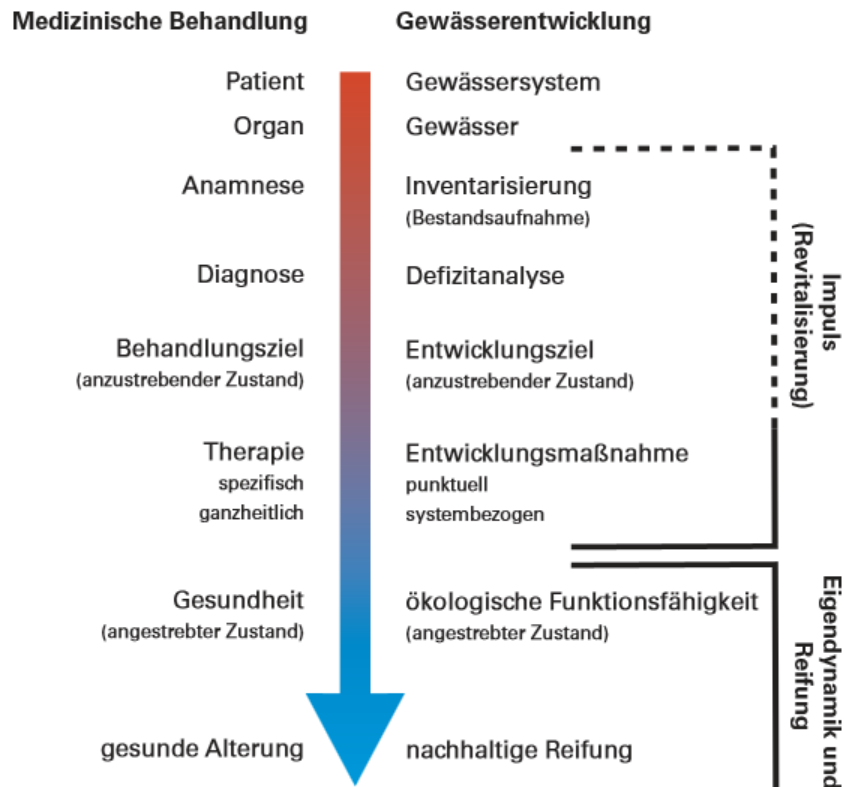


Abb. 8-1: Patient Gewässersystem: Analogie zwischen medizinischer Behandlung und Gewässerentwicklung (REY 2004, S. 11).

Das – streng genommen – technisch hergestellte naturnahe Umgehungsgewässer im Projektgebiet wird sich – eben wie es Fließgewässer tun – eigendynamisch weiterentwickeln. Ein Rest an Naturferne wird allein durch die veränderten Abflüsse und den stark veränderten Sedimenttransport immer vorhanden bleiben.

Um aber bezüglich der Hydrologie und Morphologie einen gewässertypischen, „dynamischen Gleichgewichtszustand“ zu erreichen und diesen erhalten zu können, werden weitere Maßnahmen und eine „sanfte Steuerung der Eigenentwicklung“ (SCHERLE 1999) erforderlich sein. Aus diesem Grund sollten bereits frühzeitig unterschiedliche Steuerungsoptionen (hydrologisch und morphologisch) ins Auge gefasst werden.

Berechnungen und Modelle für die Planung und Umsetzung von Renaturierungsvorhaben müssen unter Umständen nach einer gewissen Laufzeit des Projektes an die durch eigendynamische Entwicklung veränderten Ausgangsbedingungen angepasst werden, um die ökologische Funktionsfähigkeit zu erhalten. Dies kann eine Nachjustierung der Eingangsvariablen erfordern. Bei FG mit eigendynamischer Entwicklung, die ihren Lauf selbst bestimmen dürfen und deren Bewuchs am Ufer sich frei entfalten kann, ist es nicht möglich, präzise Vorhersagen zu treffen, wann sich welche Zustände einstellen werden.

Während sich beim Beispiel von ROSGEN (1994) und REY (2004) ein Gewässer zur natürlichen Lauform rückentwickelt, kann beim OHB eher von einer Entwicklung gesprochen werden. Damit wird der OHB nicht seinen alten Gleichgewichtszustand wiedererlangen, wie

bei einem bereits bestehenden FG, sondern wird diesen erst einmal anstreben. Das geschieht allerdings auch auf einem tieferen Niveau (vgl. ROSGEN 1994), bezogen auf die umgebenden Donauaue. Deswegen bleibt er an diesen Stellen von der „Altaue“ abgekoppelt und muss sich seine eigene Aue, die Sekundäraue, schaffen. Die Überflutungsdynamik bleibt damit weiterhin stark vermindert und kann sich nur in der von der Ausleitungsmenge vorgegebenen Spannweite abspielen.

Im mittleren Teil des UG, an den Stellen, wo sich während einer ÖF die Wassermengen von OHB und Donau überlagern, kommt es zu gemeinsamen Überflutungsflächen. Dass diese zwei- bis dreimal jährlich auftretenden und auf kleine Bereiche begrenzten Flächen nicht mit natürlichen Verhältnissen zu vergleichen sind, konnte aufgezeigt werden.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse muss daher von Standort zu Standort unterschieden werden, ob

- die hydrologische Veränderung nur eine Art „Wiedervernässung“ durch Grundwasseranstieg infolge der Inbetriebnahme des Umgehungsgewässers ist.
- eine scheinbare Dynamisierung mit wechselnden Wasserständen erfolgt, die zu einem permanenten Wechsel von aquatischen und terrestrischen Lebensräumen führt, jedoch unterhalb einer für den Naturraum typischen Schwankungsamplitude verbleibt und dadurch kaum morphodynamische Prozesse auslöst.
- eine echte Dynamisierung mit entsprechender Morphodynamik vorliegt, die zu einer Umlagerung im Gewässerbett, Störung der Uferbereiche und langfristig zu einer Laufverlagerung des Gewässers führt, und ob damit auch eine Störung der Bodenoberfläche durch Sedimentation verbunden ist, was anschließend die gewünschte Sukzession wieder in Gang setzt und neue Lebensräume schafft.

Es ist in solchen Systemen sehr schwierig, längerfristige Trends vorherzusagen. In vielen Fällen lässt sich nicht einmal klar trennen, ob die angestoßene Entwicklung tatsächlich durch die Dynamisierung (Baumaßnahmen) oder durch die Steuerung hervorgerufen wurde oder ob sie nur eine Folge der eigendynamischen Entwicklung darstellt. Ob die angestoßenen Prozesse für das Ziel der Renaturierung ausreichen oder wie lange ihre Dynamik anhält, bleibt abzuwarten. Dennoch lassen sich schon jetzt einige Empfehlungen aussprechen.

8.3 Empfehlungen

8.3.1 Vorbemerkung

Während von CYFFKA ET AL. (in press) bereits umfangreiche Empfehlungen zum Dynamisierungsprojekt sowie zum E+E-Haupt- und Begleitvorhaben formuliert worden sind, sollen hier die speziell an hydrologischen und gewässermorphologischen Gesichtspunkten ausgerichteten Empfehlungen, die sich aus den hier vorgestellten Untersuchungen ableiten lassen, genannt werden. Für eine konkrete Umsetzung bedarf es u. U. ergänzender oder zusätzlicher Untersuchungen.

Die Gliederung orientiert sich einerseits an den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Dynamisierungsmaßnahmen, – Umgehungsgewässer und Ökologische Flutung –, andererseits wird zwischen projektbezogenen und allgemeinen Empfehlungen unterschieden. Wenn es zum Verständnis erforderlich sein sollte, erfolgen ergänzende Anmerkungen. Da die Empfehlungen als Hilfestellung für die Planung und Umsetzung von künftigen Renaturierungsprojekten gedacht sind, ist die Erweiterung auf diese überregionale Ebene besonders nützlich. In einem extra Punkt (8.3.4) werden „Tipps zum Monitoring und den Methoden“ gegeben, die für die wissenschaftliche Begleitung solcher Maßnahmen relevant sein könnten.

8.3.2 Umgehungsgewässer

Empfehlung 1: Wasserführung (Menge)

- **Projekt:** Bessere Ausnutzung der laut Planfeststellung möglichen Dynamik in der Wasserführung des Ottheinrichbaches, insbesondere bei den unteren und oberen Abflüssen. Insgesamt sollte eine Erhöhung der Abflüsse angestrebt werden.
- **Allgemein:** Von einer starren Ausleitungsmenge, die nur an der mittleren Wasserführung des Vorfluters ausgerichtet ist, ist abzuraten. Die natürliche Wasserführung von Zuflüssen und anderen Auengewässern sollte beachtet werden.
- **Anmerkung:** Generell sollte versucht werden, eine Betonung der Minima und Maxima der Wassermengen herbeizuführen, da nur so eine Dynamik erzeugt werden kann. Schnelle, sprunghafte Änderungen der Wasserführung sollten grundsätzlich vermieden werden. Die Ausleitung sollte mehr als 1 % (JUNGWIRTH et al. 1998 in KAUFMANN 2012) von der mittleren Wasserführung des Hauptflusses betragen, um damit auch größere Schwankungsamplituden erzeugen zu können.

Empfehlung 2: Wasserführung (Sonderfälle)

- **Projekt:** Um gezielt die Ausbildung oder den Erhalt von Weichholzauestandorten zu fördern, sollte eine von der „regulären Betriebsweise“ abweichende Abflusssteuerung zur Erhöhung der Abflussdynamik ermöglicht werden. In diesem Zusammenhang sollten Niedrigwasserzeiten und deren Verstärkung durch manuelle Steuerung der Dotationsmengen Berücksichtigung finden. Dies sollte über mehrere Wochen (etwa einmal im Jahr für eine Dauer von 4 Wochen, im Herbst) stattfinden. Bei Bedarf (um z. B. Kolmationsprozesse zu vermeiden) sind längere Phasen mit manuell

eingestellten höheren Abflüssen mit einer gewissen Mindestlaufzeit denkbar.

- **Allgemein:** Eine an ökologischen Belangen orientierte Wasserführung sollte ermöglicht werden.
- **Anmerkung:** Je unnatürlicher die Ausgangsbedingungen im Abflussregime des Vorfluters sind und je mehr wasserbautechnische Maßnahmen für die Dynamisierung eingesetzt werden, umso wichtiger ist die Steuerung der Wasserführung. Für eine an ökologischen Belangen orientierte Wasserführung bedarf es der Möglichkeit einer individuellen Steuerung, die im Einzelfall geregelt werden muss.

Empfehlung 3: Geschiebemanagement (Kiesbänke) und Gerinnemorphologie

- **Projekt:** Bei sedimentlimitierten Systemen ist die Überwachung des Geschiebevolumens und ggf. Geschiebemanagements zwingend erforderlich. Im Ottheinrichbach sollte deswegen durch Zugabe oder Entnahme an – sich möglicherweise entwickelnden – Problemstellen eine Nachbesserung stattfinden.
- **Allgemein:** Bei Bedarf ist die Initiierung eines Geschiebemanagements oder eine Umgestaltung von Gewässerabschnitten sinnvoll.
- **Anmerkung:** Bei längerfristigem Geschiebedefizit (was vermutlich alle Umgehungsgewässer betrifft) ist die Beobachtung besonders wichtig. Wenn sich aufgrund der Eigendynamik Problemstellen entwickeln, die den Zielen der Renaturierung (z. B. Durchgängigkeit) entgegenstehen, kann auch eine Veränderung des Gerinnequerschnitts notwendig werden.

Empfehlung 4: Strukturelemente (Totholz)

- **Projekt:** Die aktuell gängige Praxis einer (Durch-)Schleusung von Totholzelementen durch Bauwerke statt Entnahme und Entsorgung sollte beibehalten werden.
- **Allgemein:** Zur Förderung der Strukturvielfalt sollte Totholz in den Gewässern belassen ggf. erneuert werden.

Empfehlung 5: Entwicklungskorridor und Gewässerrandstreifen

- **Projekt:** Von einer Nutzung des Entwicklungskorridors vom OHB sollte abgesehen und Eingriffe vermieden werden. Die Breite von 25 m (beidseitig) ist für den OHB ausreichend großzügig gewählt, wird aber über weite Strecken durch Fahrwege unterbochen und dadurch deutlich reduziert.
- **Allgemein:** Bei der Planung von Umgehungsgewässern sollte darauf geachtet werden, dass der Entwicklungskorridor so wenig wie möglich genutzt und durch Bauwerke die Linienführung nicht übermäßig fixiert wird. Die Breite des Korridors hängt von der Größe des Fließgewässers und seiner Abflussdynamik ab.

8.3.3 Ökologische Flutung

Empfehlung 6: Wasserführung (Menge)

- **Projekt:** Die Ausleitungsmengen sollten bei ÖF im Rahmen der (technischen) Möglichkeiten erhöht werden, um die Dynamik zu steigern. Auswirkungen von erhöhten Ausleitungsmengen sind derzeit nicht ausreichend bekannt und sollten getestet werden. Nur mit möglichst großen Spannweiten kann eine zielführende prozessgesteuerte Dynamisierung erfolgen.

- **Allgemein:** Starre Grenzwerte sollten bei der Planung vermieden werden, da sie eine ökologische Steuerung zumeist verhindern. Wenn Grenzwerte zur Steuerung von Ausleitungsmengen festgeschrieben werden, sollte dies erst nach einer Testphase aufgrund von tatsächlichen Erfahrungswerten erfolgen.

Empfehlung 7: Wasserführung (Dauer)

- **Projekt:** Die Dauer von ÖF sollten grundsätzlich verlängert werden, wenn der Grenzwert nur kurzfristig unterschritten wird, bei kleineren ÖF (kürzer als 24 Std. und weniger als 700 m³/s) sollte hingegen über ein Aussetzen der Flutung nachgedacht werden. In diesem Zusammenhang ist neben der Vorhersage von Hochwasserereignissen auch der Aufwand einer Steuerung entscheidend. Nicht steuerbare Überlaufschwelle hätten gegenüber der gewählten Variante nach Ansicht des Verfassers Vorteile.
- **Allgemein:** Starre Grenzwerte sollten bei der Planung vermieden werden bzw. nachträglich aufgrund von tatsächlichen Erfahrungswerten verändert werden können. Ziel sollte sein, den Steuerungsaufwand zu minimieren.

Empfehlung 8: Ergänzung am Ausleitungsbauwerk für die ÖF

- **Projekt:** Ein kleines mit nur geringem Abfluss (1-2 m³/s) betriebenes Gewässer (ähnlich einer technischen Fischaufstiegsanlage) zwischen Ausleitungsbauwerk und Längenmühlbach, kurz vor und nach einer ÖF, würde: (a) für die aquatischen Lebewesen direkt im Tosbecken des Ausleitungsbauwerks zu einer Verbesserung führen, (b) bei entsprechender Steuerung das schnelle Ansteigen und Absinken des Wasserspiegels im Längenmühlbach und damit im gesamten westlichen Teil des PG dämpfen und damit insgesamt zu einer naturnäheren Flutung beitragen.
- **Anmerkung:** Bei kurzzeitig aufeinanderfolgenden ÖF kann ein komplettes Schließen und wieder Öffnen des Ausleitungsbauwerks naturschutzfachlich nicht gewünscht sein.

Empfehlung 9: Aufenthaltsdauer von Wasser

- **Projekt:** Es sollte eine Optimierung der Aufenthaltsdauer des bei einer Ökologischen Flutung ausgeleiteten Wassers angestrebt werden mit dem Ziel, mehr Wasser länger im Wald zu behalten. Maßnahmen können sein:
 - Beibehaltung der Steuerung des Drosselbauwerks. Möglichst frühzeitiges Schließen des Bauwerks. Öffnen, erst nachdem die beiden Flutmulden die Anbindung an den Längenmühlbach verloren haben.
 - Die Errichtung von Querriegeln in der temporären Rückleitung für ÖF ist zu empfehlen, um Rückstauprozesse im Auwald zu fördern.
 - Über eine Anhebung der Gerinnesohle mit kleinen Sohlgleiten an geeigneten Stellen könnte die Ausuferung erleichtert werden, da oft nur 20-30 cm zur Gewässeroberkante fehlen.
 - Weitere Maßnahmen, wie der Einbau von Querbauwerken, die für aquatische Lebewesen passierbar sind, können den Rückstau fördern und wären wünschenswert.
 - Mit einer Absenkung bzw. Erweiterung der oberen Flutmulde durch ein zusätzliches Gerinne könnte das Wasser früher in den Auwald geleitet werden. Die Flutmulde führt erst ab einem bestimmten Wasserstand im

Längenmühlbach den Abfluss in den Auwald ab.

- Temporäre Erhöhung des Stauziels der Staustufe Ingolstadt während ÖF zur Verringerung der „Sogwirkung“ bei abklingendem Hochwasser an der Donau.

Empfehlung 10: Verteilung von Wasser

- **Projekt:** Um die im Planfeststellungsverfahren vorgesehenen Ausdehnung zu erreichen, muss die flächenhafte Ausdehnung einer Ökologischen Flutung optimiert werden. Maßnahmen hierzu können sein:
 - Anschluss von bestehenden Flutrinnen und Mulden an bestehende Auen-
gewässer, insbesondere an den OHB, für eine bessere Verteilung des
Wassers zur Optimierung der hydrologischen Konnektivität.
 - Anlegen von zusätzlichen Furten, ggf. auch zusätzliches Anlegen von
tieferliegenden Bereichen entlang des Ufers des OHB, die wenige cm über
dem mittleren Wasserspiegel liegen, auf die die Gewässerdynamik
entsprechend Einfluss nehmen kann.

8.3.4 Monitoring

Über die fünf Jahre hinweg wurden sowohl bei der Geländeaufnahme als auch bei den Auswertungen neben den im Vordergrund stehenden Ergebnissen eine Reihe von methodischen Erfahrungen gesammelt.

Empfehlung 11: Monitoring

Renaturierungsvorhaben sollten nach Planung und Umsetzung durch ein umfassendes Monitoring begleitet werden. Ist dies nicht möglich sollten die tatsächlich hydrologischen Verhältnisse im Projekt erfasst werden und Abweichungen vom Planungszustand ermittelt und Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet werden. Insbesondere bei steuerbaren Bauwerken ist mit den neuen Erkenntnissen eine adaptierte Anpassung dringend zu empfehlen. Dies setzt voraus, dass entsprechende Grenzwerte variabel oder Grenzbereiche zunächst weit gefasst werden, um sie erst nach dieser Testphase, wenn nötig, in Beschlüssen zu fixieren.

Empfehlung 12: Kommunikation

Es müssen vorab verbindliche Gespräche mit allen Stakeholdern geführt werden, und dabei sollte auf eine gemeinsame Terminologie geachtet werden. Wichtig sind Arbeitstreffen, bei denen es auch um die Entwicklung von einheitlichen Zielvorstellungen geht.

Empfehlung 13: Datenmanagement

Es sollten vorab klare Richtlinien für das Datenmanagement, die Datenbeschaffung und die Datenweitergabe zwischen den einzelnen Parteien erarbeitet werden. Auch die Datenspeicherung in Datenbanken sollte zu Beginn ausführlich geklärt werden.

Empfehlung 14: Datenerfassung

Für die Auswertbarkeit der Daten, insbesondere der TLS-Daten, ist es von Vorteil, wenn die Vermessung/Aufnahme bei vergleichbaren oder ähnlichen Wasserständen durchgeführt wird. Dies gilt auch für die Erhebung anderer morphometrischer Parameter.

Empfehlung 15: Methoden: Für viele Fragestellungen werden Abflussdaten benötigt. Bei speziellen hydrologischen Messbedingungen, wie bei Hochwasser oder wenn Rückstauerscheinungen auftreten, sind Messsysteme mit Ultraschall- oder Radar-Technologie unverzichtbar. Um in einem morphologisch hochdynamischen Fließgewässer belastbare Abflussmessungen durchführen zu können, bedarf es einer Vielzahl von Abflussmessungen. Diese können gerade bei höheren Abflüssen (ÖF) nur mit entsprechenden Geräten getätigt werden. Entsprechend sollte für ein hydrologisches Monitoring sowohl bei mind. einem Bauwerk eine direkte Durchflussmessung mittels einem fest installierten Messgerät erfolgen als auch z.B. ein ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) angeschafft werden.

8.3.5 Allgemeine Empfehlungen

Empfehlung 16: Testphase und Probetrieb

Ein umfangreicher Probetrieb mit Testausleitungen mit unterschiedlichen Abflüssen sollte die vorher mit Modellen berechneten Ausleitungsmengen ergänzen. Nur so können die tatsächlichen Auswirkungen unterschiedlicher Abflüsse erfasst werden, vor allem bevor diese dann als Richtlinien für Betriebsvorschriften und Planfeststellungsverfahren herangezogen werden.

Empfehlung 17: Rückbau oder Anlage von Brücken und Bauwerken

Eine Möglichkeit, um die Konnektivität zu steigern, ist die Erweiterung oder das Öffnen von Durchlässen. Auch die Anlage von neuen Durchlässen unter Wegen, um alte Flutrinnen wieder miteinander zu verbinden, sollte, wo dies möglich ist, in Betracht gezogen werden.

Empfehlung 18: Erweiterung der Projektgrenzen, um den Vorfluter mit einzubeziehen

Anlage von Bühnen in der Donau im Bereich der beiden Rückleitungen, um diese ökologisch aufzuwerten (Habitatbereitstellung). Besonders an der „1. Rückleitung“ könnte vermutlich der Fischaufstieg noch weiter verbessert werden.

Unterhalb der Staustufe Bergheim könnte die laterale Konnektivität über Teilrenaturierungen des Hauptstromes deutlich verbessert werden. Beispielsweise könnte das Entfernen der Ufersicherungen (Versteinerungen) am rechten Donauufer mit stellenweiser Absenkung an den bei einem HQ₁₀ überströmten Stellen diesem Ziel zuträglich sein.

Empfehlung 19: Schwellbetrieb

Durch eine Abschaffung des Schwellbetriebs an den Staustufen könnten die negativen Effekte, die durch die unnatürlich schnellen Wasserstandsschwankungen hervorgerufen werden, vermieden werden.

Empfehlung 20: Erweiterungsmaßnahmen:

Um weitere Wasserflächen als Ersatz für eine entkoppelte Aue zu schaffen, sollten zusätzliche Umgehungsflächen nördlich der Donau oder ergänzende Querverbindungen angelegt werden. Varianten wurden zum Teil bei der Machbarkeitsstudie oder anderen Planungsunterlagen bereits vorgeschlagen.

9. FAZIT

„Die Beweglichkeit des zu behandelnden Elements lässt die Übertragung einer einzelnen Erfahrung und allgemeine Schlüsse nur selten zu“.....“Der wichtigste Satz aller Studien ist der, dass jeder Fluss ein Individuum ist, das seine eigene Behandlung verlangt, da die bestimmten Faktoren, Wassermenge, Gefälle, Geschiebe und Uferbildungen bei allen Flüssen, ja sogar innerhalb einzelner Flussstrecken große Verschiedenheiten aufweisen. Nichts wäre weniger angezeigt, und nichts würde zu größerer Geldverschwendung führen, als wenn alle Flüsse nach einer Schablone behandelt würden;“ (Denkschrift der Bayerischen Obersten Baubehörde 1909, Vorwort in Patt et al. 2011).

Wie individuell der Ottheinrichbach als Fließgewässer zu behandeln ist, konnte durch zahlreiche Beispiele aufgezeigt werden. Insofern ist der über hundert Jahre alten Erkenntnis zur eigenen Behandlung nicht viel mehr hinzuzufügen.

Naturnaher Wasserbau, begrenzt auf das Anlegen von naturnahen Formen (Prallhänge, Kiesbänke, Totholzstrukturen), ist nicht ausreichend, um Flusslandschaften zu reaktivieren. Vielmehr müssen die dynamischen Prozesse gefördert werden, die zu der Entstehung der Strukturen führen.

Die Anlage eines naturnahen Fließgewässersystems mit technisch gesteuerten Abflussschwankungen reicht deshalb noch nicht aus, um Auen ausreichend zu dynamisieren!

Wenn die Rahmenbedingungen (insbesondere die Ausleitungsmengen) nicht geändert werden und auch die topographischen Verhältnisse, die direkt die hydrologischen Verhältnisse beeinflussen, nicht „überflutungs-freundlich“ umgestaltet werden, kann es maximal zu einer Ausbildung einer Sekundäraue auf sehr begrenzten Flächen kommen. Die Ottheinrichbachsaue würde dann nur innerhalb der rezenten Donauaue liegen und würde auch innerhalb ihres Entwicklungsraumes für auentypische Pflanzen und Tiere einen Lebensraum mit den hydromorphologischen Funktionen übernehmen können.

Dennoch, es ist mehr als ein Tropfen auf den heißen Stein, denn der Ottheinrichbach wird seine Spuren hinterlassen, die Ufer formen und sein Bett verändern. Auch wird er neben dem Geschiebe auch den Gedanken der Renaturierung weitertransportieren.

*„Alles fließt (panta rhei), nichts besteht, noch bleibt es je dasselbe“
(Heraklit 550–480 v. Chr.)*

10. LITERATURVERZEICHNIS

- ACKERS, P.; CHARLTON, F. G. (1970): The geometry of small meandering streams: Institution of Civil Engineers.
- ADELKOFER, J. (2012): Erstellen einer Gewässerstrukturkartierung und Durchführung einer Makrozoobenthoskartierung zur Untersuchung der Besiedlungsdynamik an einem neuen Umgebungsgewässer zwischen Neuburg an der Donau und Ingolstadt. DA. Weihenstephan Triesdorf, Weihenstephan Triesdorf.
- AFANA, A.; SOLÉ-BENET, A.; PÉREZ, J. L. (2010): Determination of Soil Erosion Using Laser Scanners. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world: Brisbane, Australia, International Union of Soil Sciences.
- AHNERT, F. (1994): Equilibrium, scale and inheritance in geomorphology. In: *Geomorphology* 11 (2), S. 125–140.
- AHNERT, F. (2003): Einführung in die Geomorphologie. 26 Tabellen. 3., aktualisierte und erg. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB für Wissenschaft).
- ALHO, P.; KUKKO, A.; HYYPPÄ, H.; KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; JAAKKOLA, A. (2009): Application of boat-based laser scanning for river survey. In: *Earth surface processes and landforms* 34 (13), S. 1831–1838.
- ALP, M.; KARPATI, T.; WERTH, S.; GOSTNER, W.; SCHEIDEGGER, C.; PETER, A. (2011): Erhaltung und Förderung der Biodiversität von Fließgewässern. In: *Wasser Energie Luft* 103, S. 216–223.
- AMOROS, C.; ROUX, A. L.; REYGROBELLET, J. L.; BRAVARD, J. P.; PAUTON, G. (1987): A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. In: *Regulated Rivers*, S. 17–36.
- ANDERSON, A. G.; PARKER, G.; WOOD, A. (1975): The flow and stability characteristics of alluvial river channels.
- ANDREWS, E. D. (1979): Scour and fill in a stream channel, East Fork River, western Wyoming. US Govt. Print. Off.
- ARAUNER, U. (2008): Flusslandschaft der Donau und Siedlungsentwicklung aus hydrogeologischer Sicht. In: Bayern und Ingolstadt in der Karolingerzeit, S. 295–330.
- ARONSON, J.; CLEWELL, A. F.; BLIGNAUT, J. N.; MILTON, S. J. (2006): Ecological restoration: A new frontier for nature conservation and economics. In: *Journal for Nature Conservation* 14 (3-4), S. 135–139.
- ASC TEC (2015): AscTec Falcon 8 /// UAV für Leistung, Präzision & Sicherheit. Ascending Technologies. Online verfügbar unter <http://www.ascotec.de/uav-uas-drohnen-flugsysteme/ascotec-falcon-8/#pane-0-1>, zuletzt geprüft am 08.10.2015.
- ASHMORE, P. E. (2001): Braiding phenomena: statics and kinetics. In: *Gravel Bed Rivers V*, S. 95–121.
- ASHMORE, P. E.; CHURCH, M. A. (1998): Sediment transport and river morphology: a paradigm for study. In: KLINGEMAN, P. C. (Hg.): *Gravel-bed Rivers in the Environment: Water Resources Publication*, S. 115–148.

- AUENGLOSSAR (2010): Auenglossar. Online verfügbar unter <http://www.auenzentrum-neuburg-ingolstadt.de/auenforum/auenglossar>, zuletzt geprüft am 04.11.2015.
- AUFLEGER, M.; HAFNER, T.; NIEDERMAYR, A.; SCHINDLER, M.; SCHMAUTZ, M. (2005): Uferrückbau und eigendynamische Entwicklung von geschiebeführenden Flüssen—. In: *Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft* 57 (1-2), S. 17–25.
- AUSTRIAN HYDRO POWER (Verbund AHP) (2001): Donaukraftwerk Greifenstein. "Betriebsordnung Gießgang". (gültig ab 01.01.2001).
- BACH, M. (1999): XIII Landschaftspflege und -nutzung in der Praxis Fließgewässer. XIII 7.15.1 Gewässerrandstreifen Aufgaben und Pflege. In: KONOLD, W., BÖCKER, R. UND HAMPICKE, U. (Hg.): Handbuch Naturschutz und Landschaftspflege. Kompendium zu Schutz und Entwicklung von Lebensräumen und Landschaften. Landsberg: ecomed.
- BAER, K. E. VON (1860): Über ein allgemeines Gesetz in der gestaltung der Flusstäler. St Petesburg (Bull. Acad. Sic.).
- BAKER, V. R. (1994): Geomorphological understanding of floods. In: *Geomorphology* 10 (1), S. 139–156.
- BAKUŁA, M.; OSZCZAK, S.; PELC-MIECZKOWSKA, R. (2009): Performance of RTK positioning in forest conditions: case study. In: *Journal of Surveying Engineering* 135 (3), S. 125–130.
- BARBOUR, M. T.; GERRITSEN, J.; SNYDER, B. D.; STRIBLING, J. B. (1999): Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers. In: *USEPA, Washington*.
- BARSCH, D.; MÄUSBACHER, R.; PÖRTGE, K.-H.; SCHMIDT, K.-H. (Hg.) (1994): Messungen in fluvialen Systemen. Feld- und Labormethoden zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushaltes. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- BARTH, U.; GUMPINGER, C. (2008): Morphologischer Vergleich natürlicher und anthropogen veränderter Gewässerabschnitte im Krems-System. Linz: Amt der Oberösterreichischen Landesregierung (Gewässerschutz-Bericht, Unterabteilung Gewässerschutz, 38).
- BASH, J. S.; RYAN, C. M. (2002): Stream restoration and enhancement projects: is anyone monitoring? In: *Environmental management* 29 (6), S. 877–885.
- BAUER, F. (1965): Der Geschiebehaushalt der bayerischen Donau im Wandel wasserbaulicher Maßnahmen. In: *Die Wasserwirtschaft* Jg. 55 (4,5), S. Heft 4, S. 108 - 112, Heft 5, S. 145 - 154.
- BAUER, H. J. (1985): Bewertung des ökologischen Zustandes eines Fließgewässers. LÖLF, Mitteilungen Nr.10, Heft 3, S.10-15.
- BAUMGARTNER, A.; LIEBSCHER, H.-J. (1996): Allgemeine Hydrologie - quantitative Hydrologie. Mit 126 Tabellen. 2. Aufl. Berlin, Stuttgart [u.a.]: Borntraeger.
- BAUSTOFFRECHNER (2016): Splitt Umrechner – Wie viele Tonnen (t) je Kubikmeter (qm)?, Online verfügbar unter: <http://www.baustoffe-liefern.de/Rechner/Splitt.html>, zuletzt geprüft am 11.12.2015
- BAYERL, G. (2012): Technologie versus Ökologie? Wasserpolitik und Wassernutzung im 20. Jahrhundert in Deutschland. In: KAISER, K., MERZ, B., BENS, O. UND HÜTTL, R. F. (Hg.):

- Historische Perspektiven auf Wasserhaushalt und Wassernutzung in Mitteleuropa: Waxmann Verlag GmbH, S. 9–28.
- BAYLFW (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT)(2002): Kartier- und Bewertungsverfahren Gewässerstruktur. In: *Erläuterungsbericht, Kartier- und Bewertungsanleitung*.
- BECHTELER, W. (2006): Sedimentquellen und Transportprozesse. In: *Schriftenreihe „ALPRESERV- Sustainable Sediment Management in Alpine Reservoirs considering ecological and economical aspects“*. Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München. Neubiberg.
- BECHTELER, W.; BROMBACH, H.; DILLMANN, R.; FRÖHLICH, K. D.; JÜRGING, P.; KRON, W. ET AL. (2013): Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen und Schutz: Springer Berlin Heidelberg.
- BECKER, B.; KÖNGETER, J.; SCHÜTTRUMPF, H.; FLÖGEL, R.; FORBERIG, S. (2014): Zur Ermittlung von Grundwasserständen für Karten zur Gefährdung des Grundwasseranstiegs infolge eines Hochwassers. In: *Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz*: Springer, S. 39–50.
- BENISCHKE, R.; HARUM, T. (1990): Determination of discharge rates in turbulent streams by salt tracer dilution applying a microcomputer system. Comparison with current meter measurements. In: *Hydrology in mountainous regions, I, Hydrological measurements: The water cycle, IAHS Publ* (193), S. 215–221.
- BERALDIN, J. A.; BLAIS, F.; LOHR, U. (2010): Laser scanning technology. In: *VOSSELMAN, G. UND MAAS, H.-G. (Hg.): Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing, S. 1–42.
- BERGOLZ, C. (2006): Renaturierung von Fließgewässern unter Beachtung des Hochwasserschutzes.
- BERNHARDT, E. S.; PALMER, M.; ALLAN, J. D.; ALEXANDER, G.; BARNAS, K.; BROOKS, S. ET AL. (2005): Synthesizing U. S. river restoration efforts. In: *Science(Washington)* 308 (5722), S. 636–637.
- BESL, P.; MC KAY, N. (1992): Method for registration of 3-D shapes. In: *Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2 Bände (14), S. 239–256.
- BEVINGTON, P. (1969): *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. New York: McGraw-Hill.
- BFN (O.J.): BfN: Kartendienst Flussauen in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bfn.de/0503_karten.html, zuletzt geprüft am 07.10.2015.
- BFN (2015): *Gewässer und Auen - Nutzen für die Gesellschaft*.
- BILBY, R. E. (1984): Removal of woody debris may affect stream channel stability. In: *Journal of Forestry* 82 (10), S. 609–613.
- BIRD, S.; HOGAN, D.; SCHWAB, J. (2010): Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy. In: *Earth surface processes and landforms* 35 (8), S. 952–970.
- BIRNBACHER, D. (2006): *Natürlichkeit: De Gruyter*.
- BISSON, P. A.; NIELSEN, J. L.; PALMASON, R. A.; GROVE, L. E. (1982): A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low streamflow. In: *Acquisition and utilization of aquatic habitat inventory information. American Fisheries Society, Western Division, Bethesda, Maryland*, S. 62–73.

- BITTMANN, E. (1968): Landschaftspflege an Gewässern. In: BUCHWALD, K. UND ENGELHARDT, W. (Hg.): Handbuch für Landschaftspflege und Naturschutz. München: Bayer. Landwirtschaftsverl (2), S. 350–374.
- BLANCKAERT, K.; GRAF, W. H. (2001): Mean flow and turbulence in open-channel bend. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 127 (10), S. 835–847.
- BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt 2007.
- BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (2013a): Wasserwirtschaft in Deutschland - Teil 1. Grundlagen.
- BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (2013b): Wasserwirtschaft in Deutschland - Teil 2. Gewässergüte.
- BMU & BFN (DEUTSCHLAND BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT & BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ) (2009): Auenzustandsbericht: Flussauen in Deutschland: BMU.
- BOCK, M.; CYFFKA, B.; HAAS, F.; STAMMEL, B. (2006): Remediation of the Danube Floodplain between Neuburg and Ingolstadt (Bavaria/Germany)—GIS supported modelling of ecological flooding. In: *Göttinger Geographische Abhandlungen* 115, S. 1–12.
- BOEHLER, W.; MARBS, A. (2004): Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner. In: *Luhmann, Th., Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage-Heidelberg*, S. 82–89.
- BOHL, M. (1986): Zur Notwendigkeit von Uferstreifen. In: *Natur und Landschaft* (4), S. 134–136.
- BÖHM, C. (2011): Wechselwirkungen zwischen dem neuen Umgehungsgewässer und Wechselwasserzonen im Auwald bei Neuburg a. d. Donau. BSc. KU-Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt.
- BOLLRICH, G. (1996): Technische Hydromechanik—Band 1. 4. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin. ISBN 3-345-00608-1.
- BORCHARDT, D. (1961): Über die Lebensbedingungen und die Besiedlung des hyporheischen Lebensraumes. In: *Archiv für Hydrobiologie Supplement* 25, S. 182–214.
- BORCHARDT, D. (1996): Ökologische Bewirtschaftung von Fließgewässern. In: Tönsmann, F. (Hg.): Sanierung und Renaturierung von Fließgewässern. Grundlagen und Praxis. Kassel: Herkules-Verl. (Wasserbau Kassel. Reihe Mitteilungen, H. 6), S. 17–24.
- BRADSHAW, A. D. (1997): What do we mean by restoration. In: URBANSKA, K. M., WEBB, N. R. UND EDWARDS, P. J. (Hg.): *Restoration Ecology and Sustainable Development*: Cambridge University Press, S. 8–14.
- BRASINGTON, J.; LANGHAM, J.; RUMSBY, B. (2003): Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. In: *Geomorphology* 53 (3), S. 299–316.
- BRASINGTON, J.; RUMSBY, B. T.; McVEY, R. A. (2000): Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. In: *Earth surface processes and landforms* 25 (9), S. 973–990.

- BRASINGTON, J.; VERICAT, D.; RYCHKOV, I. (2012): Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. In: *Water resources research* 48 (11).
- BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K.; MOONEY, H. A. (2007): The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32, S. 67–98.
- BRAY, D. I. (1982): Regime equations for gravel bed rivers. In: HEY, R. D., BATHURST, J. C. UND THORNE, C. R. (Hg.): *Gravel-bed rivers*: Wiley, S. 517–542.
- BREN, L. J. (1993): Riparian zone, stream, and floodplain issues: a review. In: *Journal of Hydrology* 150 (2), S. 277–299.
- BRICE, J. C. (1984): Planform properties of meandering rivers. In: ELLIOT, C. M. (Hg.): *River meandering*: ASCE.
- BRIEM, E. (2002): Formen und Strukturen der Fließgewässer. Ein Handbuch der morphologischen Fließgewässerkunde. Hennef: GFA (ATV-DVWK-Arbeitsbericht).
- BROOKES, A. (1987): River channel adjustments downstream from channelization works in England and Wales. In: *Earth surface processes and landforms* 12 (4), S. 337–351.
- BROOKES, A.; GREGORY, K. J. (1988): Channelization, river engineering and geomorphology. In: *Geomorphology in environmental planning*. Wiley and Sons, Chichester, UK, S. 145–167.
- BROWN, A. G. (1997): Alluvial geoarchaeology: floodplain archaeology and environmental change: Cambridge University Press.
- BRUNKE, M.; PURPS, M.; WIRTZ, C. (2012): Furten und Kolke in Fließgewässern des Tieflands: Morphologie, Habitatfunktion für Fische und Renaturierungsmaßnahmen. In: *HyWa* 56 (3).
- BRUNOTTE, E.; DISTER, E.; GÜNTHER-DIRINGER, D.; KOENZEN, U.; MEHL, D. (2009): Flussauen in Deutschland—Erfassung und Bewertung des Auenzustandes.
- BSLU (1985): Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Donau und Main. [Zusammenfassung von Untersuchungsergebnissen]. München: Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Donau und Main, [5]), S., Ill., zahlr. graph. Darst., Kt.
- BUBENZER, O. (2001): Fluviale Systeme: Steuerungsfaktoren, Reaktionszeiten, Schwellenwerte, Rückkoppelungen. Lexikon der Geographie. Hg. v. Spektrum. Spektrum Verlag. Heidelberg (I: 395-398).
- BUCH, M. W. (1988): Spätpleistozäne und holozäne fluviale Geomorphodynamik im Donautal zwischen Regensburg und Straubing. Heft 21, 197 S.
- BUCH, M. W.; HEINE, K. (1995): Fluvial geomorphodynamics in the Danube River valley and tributary river systems near Regensburg during the Upper Quaternary - theses, questions and conclusions. In: J. HAGEDORN (Hg.): *Late Quaternary and present-day fluvial processes in Central Europe*. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (100), S. 53–64.
- BULL, W. B. (1991): Geomorphic responses to climatic change.
- BUTLER, J. B.; LANE, S. N.; CHANDLER, J. H. (2010): Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing. In: *Journal of Hydraulic Research* 39 (5), S. 519–529.

- BÜTTNER, G. (2003): Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern. München: Bayer. Geolog. Landesamt (GLA-Fachberichte, 20).
- BÜTTNER, G.; DIEPOLDER; DOBNER (2002): Erläuterung zur Hydrogeologischen Karte 1:100 000 Planungsregion 10 Ingolstadt. Geowissenschaftliche Landesaufnahme.
- CANON (2015): Canon EOS 350D (Archiv). EOS DSLRs und kompakte Systemkameras. Online verfügbar unter http://www.canon.de/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_350c/, zuletzt geprüft am 02.06.2015.
- CASAS, A.; BENITO, G.; THORNDYCRAFT, V. R.; RICO, M. (2006): The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. In: *Earth surface processes and landforms* 31 (4), S. 444–456.
- CASAS, A.; LANE, S. N.; YU, D.; BENITO, G. (2010): A method for parameterising roughness and topographic sub-grid scale effects in hydraulic modelling from LiDAR data.
- CASTELLE, A. J.; JOHNSON, A. W.; CONOLLY, C. (1994): Wetland and Stream Buffer Size Requirements—A Review. In: *Journal of Environment Quality* 23 (5), S. 878.
- CENDERELLI, D. A.; WOHL, E. E. (2003): Flow hydraulics and geomorphic effects of glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. In: *Earth surface processes and landforms* 28 (4), S. 385–407.
- CHALLIS, K.; HOWARD, A. (2006): A review of trends within archaeological remote sensing in alluvial environments. In: *Journal Title: Archaeological prospection* 13 (4).
- CHEN, Y.; MEDIONI, G. (1992): Object modelling by registration of multiple range images. In: *Image and Vision Computing* 10 (3), S. 145–155.
- CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. (1971): Physical geography. A systems approach. London: Prentice-Hall.
- CHOW, V. T. (1959): Open channel hydraulics. New York, McGraw- Hill Book Co., 680 p.
- CHURCH, M. (1992): Channel morphology and typology. In: *The rivers handbook* 1, S. 126–143.
- CLIFFORD, N. J. (1993): Formation of riffle—pool sequences: field evidence for an autogenetic process. In: *Sedimentary Geology* 85 (1), S. 39–51.
- COBBY, D. M.; MASON, D. C.; DAVENPORT, I. J. (2001): Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 56 (2), S. 121–138.
- CONNELL, J. H. (1978): Diversity in tropical rain forests and coral reefs. In: *Science* 199 (4335), S. 1302–1310.
- COUPER, P. R.; MADDOCK, I. P. (2001): Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. In: *Earth surface processes and landforms* 26 (6), S. 631–646.
- CURRAN, J. C. (2010): Mobility of large woody debris (LWD) jams in a low gradient channel. In: *Geomorphology* 116 (3), S. 320–329.

- CYFFKA, B.; BINDER, F.; EWALD, J.; GEIST, J.; GRUPPE, A.; HEMMER, I. ET AL. (Hg.) (in press): Neue dynamische Prozesse im Auenwald. Monitoring der Auenrenaturierung an der Donau zwischen Neuburg und Ingolstadt (Naturschutz und biologische Vielfalt).
- CYFFKA, B.; STAMMEL, B.; WALENTOWSKI, H. (2008): Riparian forests in the Natura 2000 System: development of semi-natural floodplains by specific management of FFH- Areas. In: *Geo Öko* (29 (1-2), S. 54–72.
- CZERNY, R., KÖNIG, F., OBERLE, P., LEHMANN, B., NESTMANN, F. (Hg.) (2010): Werkzeuge zur Bewertung urbaner Fließgewässer. 33. Dresdner Wasserbaukolloquium „Wasserbau und Umwelt - Anforderungen, Methoden, Lösungen“, 17. und 18. März 2010. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, S. 485 - 494.
- DA SILVA, A. M. A. F. (1991): Alternate bars and related alluvial processes. MSc thesis.
- DA SILVA, A. M. A. F. (2006): On why and how do rivers meander.
- DAHM, V.; DÖBBELT-GRÜNE, S.; HAASE, P.; HARTMANN, C.; KAPPES, H. (2014): Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle.
- DAL CIN, C.; MOENS, L.; DIERICKX, P.; BASTIN, G.; ZECH, Y. (2005): An integrated approach for realtime floodmap forecasting on the Belgian Meuse River. In: *Natural hazards* 36 (1-2), S. 237–256.
- DARBY, S.; SEAR, D. (Hg.) (2008): River Restoration. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- DÉCAMPS, H.; NAIMAN, R. J. (1989): L'écologie des fleuves. In: *La recherche* (208), S. 310–319.
- DÉCAMPS, H.; NAIMAN, R. J. (1990): The ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones: CRC Press.
- DERRON, M.-H.; JABOYEDOFF, M. (2010): Preface" LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization". In: *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (9), S. 1877–1879.
- DICKHAUT, W.; FRANKE, K.; SCHWARK, A. (2006): Fließgewässerrenaturierung heute. Auf dem Weg zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Norderstedt.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1996): Wasserwesen. Begriffe ; Normen. 3. Aufl., Stand der abgedr. Normen: Oktober 1994. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (DIN-Taschenbuch / Hrsg.: DIN, Deutsches Institut für Normung e.V, 211).
- DISTER, E. (1980): Geobotanische Untersuchungen in der hessischen Rheinaue als Grundlage für die Naturschutzarbeit.
- DISTER, E. (1991): Situation der Flussauen in der Bundesrepublik Deutschland. In: *Laufener Seminarbeiträge* 4 (91), S. 8–16.
- DISTER, E. (1997): Machbarkeitsstudie Auenkonzept Ingolstadt. Auenrenaturierung an der Donau zwischen den Staustufen Bergheim und Ingolstadt. Hg. v. WWF Auen Institut. Rastatt.
- DOETSCH, P.; RÜPKE, A. (1998): Revitalisierung von Altstandorten versus Inanspruchnahme von Naturflächen: Gegenüberstellung der Flächenalternativen zur gewerblichen Nutzung durch qualitative, quantitative und monetäre Bewertung der gesellschaftlichen Potentiale und Effekte.

- DOLD, C. (2010): Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans: Leibniz-Univ., Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik.
- DOLD, C.; RIPPERDA, N.; BRENNER, C. (2007): Vergleich verschiedener Methoden zur automatischen Registrierung von terrestrischen Laserscandaten: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Wichmann.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S.; MARZOLFF, I.; BLASCHKE, T. (2014): Gully Mapping On Multiple Scales Based On UAV and Satellite Data. Dissertation, University of Salzburg, Austria and Goethe University Frankfurt, Germany.
- DOPPLER, G.; FIEBIG, M.; MEYER, R. K. F. (2002): Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 10 Ingolstadt. Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:10000.
- DUAN, J. G. (2005): Analytical approach to calculate rate of bank erosion. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 131 (11), S. 980–990.
- DÜCHS, J. (2014): „Wann wird's an der Isar wieder schön?“ – Die Renaturierung der Isar in München: Über das Verständnis von Natur in der Großstadt: Utz Verlag GmbH.
- DVWK (1984): Ökologische Aspekte bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern. Merkblätter DK 627.4 Gewässerausbau, DK 574 Ökologie. Hamburg: Kommissionsvertrieb P. Parey (DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 204).
- DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. In: *DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Bd 220*.
- DVWK (1996): Zur aktuellen Leitbilddiskussion. DVWK- Nachrichten 148. Bonn.
- DVWK (1998): Feuchtgebiete. Wasserhaushalt und wasserwirtschaftliche Entwicklungskonzepte ; Fallbeispiele. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser (DVWK-Materialien).
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Merkblatt 251. Hg. v. DVWK. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau.
- DWA (2010a): DWA-Regelwerk / Merkblatt 607. Altgewässer - Ökologie, Sanierung und Neuanlage. Hennef.
- DWA (2010b): DWA-Regelwerk / Merkblatt 610. Neue Wege der Gewässerunterhaltung - Pflege und Entwicklung von Fließgewässern. Hennef.
- DWA (2014): DWA-Regelwerk / Merkblatt 509. Fischauftstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Hennef.
- DWD (o. J.): Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Startseite. Online verfügbar unter <http://www.dwd.de/>, zuletzt geprüft am 07.10.2015.
- DYCK, S.; PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie.-536 S. In: *Berlin (Verl. Bauwesen)*.
- DYNESIUS, M.; NILSSON, C. (1994): Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern 3rd of the world. In: *Science* (266), S. 753–762.
- EATON, B. C.; LAPOINTE, M. F. (2001): Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte Marguerite River. In: *Geomorphology* 40 (3), S. 291–309.

- EHLERT, T. (2012): Bundesweite Projekte zur Auenrenaturierung. Auenkonferenz. Schloss Grünau, 18.12.2012.
- EICHLER, H. (2005): Landschaft als Lebensraum Das definitorische Landschafts-Problem. Artenvielfalt in Heidelberg. 3. Juni 2000 / 8. Juni 2002 / 12. Juni 2004. 2. bearbeitete und erweiterte Auflage. Hg. v. D. BRANDIS, H. HOLLERT UND V. STORCH. Zoologisches Institut der Universität Heidelberg. Heidelberg.
- EINSTEIN, A. (1926): Die Ursache der Mäanderbildung der Flussläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes. In: *Naturwissenschaften* 14 (11), S. 223–224.
- EISENBEISS, H.; ZHANG, L. (2006): Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5*, 90e96.
- ELTNER, A. (2013): Konzeption einer Methode zur quantitativen Erfassung von Bodenerosion durch integrierte Aufnahme mit einer Mikrodrohne und einem terrestrischen Laserscanner. In: *Publikationen der DGPF eV* 22, S. 289–297.
- EMMETT, W. W.; WOLMAN, M. G. (2001): Effective discharge and gravel-bed rivers. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 26 (13), S. 1369–1380.
- ENGELUND, F.; FREDSOE, J. (1982): Sediment ripples and dunes. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 14 (1), S. 13–37.
- ENTWISTLE, N. S.; FULLER, I. C. (2009): Terrestrial laser scanning to derive the surface grain size facies character of gravel bars. In: HERITAGE, G. L., LARGE, ANDREW R. G UND CHARLTON, M. (Hg.): *Laser scanning for the environmental sciences*. Chichester, West Sussex: Blackwell Pub., S. 102–114.
- FAHNESTOCK, R. K. (1963): Morphology and hydrology of a glacial stream--White River, Mount Rainier, Washington. US Govt. Print. Off.
- FEWTRELL, T. J.; BATES, P. D.; HORRITT, M.; HUNTER, N. M. (2008): Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. In: *Hydrological processes* 22 (26), S. 5107–5118.
- FIEBIG, M.; PREUSSER, F. (2003): Das Alter fluvialer Ablagerungen aus der Region Ingolstadt (Bayern) und ihre Bedeutung für die Eiszeitenchronologie des Alpenvorlandes. In: *Zeitschrift für Geomorphologie, NF* 47 (4), S. 449–467.
- FINSTERER, A. (1996): Naturnahe Auwaldbewirtschaftung. Ingolstädter Auwald-Symposium. Donauauen und Auwälder: 25–35. Hg. v. Stadt Ingolstadt. Ingolstadt (Ingolstädter Ökologische Schiften).
- FISCHER, P. (2014): Bericht zur Niedrigwassertestphase im Oktober 2014. Aueninstitut Neuburg (unveröffentlicht).
- FISCHER, P.; CYFFKA, B. (in press): Messung und Erfassung abiotischer Parameter, Prozesse und Strukturen. In: CYFFKA, B., BINDER, F., EWALD, J., GEIST, J., GRUPPE, A., HEMMER, I. ET AL. (Hg.): *Neue dynamische Prozesse im Auenwald. Monitoring der Auenrenaturierung an der Donau zwischen Neuburg und Ingolstadt (Naturschutz und biologische Vielfalt)*.

- FISCHER, P.; CYFFKA, B. (2013a): Wie viel Dynamik braucht ein Auwald? Hydro-geomorphologische Untersuchungen im Auwald zwischen Neuburg und Ingolstadt. In: CHIFFLARD, P., B. CYFFKA, D. KARTHE & K.-F. WETZEL (Hg.). Beiträge zum 44. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie vom 15.-17. November 2012 in Lunz am See, S. 40–44.
- FISCHER, P.; CYFFKA, B. (2013b): Ökologie und Wasserkraftnutzung - Monitoring von Renaturierungsmaßnahmen. In: WEINGARTNER, R. ;SCHÄDLER, B. (Hg.): Wasserressourcen im globalen Wandel. Hydrologische Grundlagen – von der Messung zur Anwendung. Beiträge zum Tag der Hydrologie 4. bis 6. April 2013 an der Universität Bern. Bern (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 32.13), S. 185–193.
- FISCHER, P.; CYFFKA, B. (2014): Gesteuerte Hydrologie im Auwald bei Neuburg a.d. Donau - Dynamisierungsmaßnahmen zwischen Staustufen. In: CYFFKA, B. (Hg.): Wasser - Landschaft – Mensch in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, Beiträge zum Tag der Hydrologie am 20./21. März 2014 an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt. Eichstätt (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 34.14), S. 169–176.
- FISCHER, P.; CYFFKA, B.; KUBA, M. (in press): Messung und Erfassung abiotischer Parameter, Prozesse und Strukturen. Grundwasser und Bodenfeuchte. In: CYFFKA, B., BINDER, F., EWALD, J., GEIST, J., GRUPPE, A., HEMMER, I. ET AL. (Hg.): Neue dynamische Prozesse im Auenwald. Monitoring der Auenrenaturierung an der Donau zwischen Neuburg und Ingolstadt (Naturschutz und biologische Vielfalt).
- FISCHER, P.; CYFFKA, B.; KUBA, M. (2013): E+E Begeleitvorhaben Monitoring auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen. 3. Zwischenbericht vom 30.04.2013. Teilprojekt II: Fluviale Morphodynamik, Bodenfeuchte und Grundwasser-Monitoring hydrologischer Parameter. KU-Eichstätt-Ingolstadt. Eichstätt.
- FISCHER, P.; HAAS, F.; CYFFKA, B. (2012a): Driving forces in a floodplain restoration projekt-interaction between surface water, groundwater and morphodynamic processes during an ecological flooding. Erosion and Sediment Yields in Changing Environment. In: Collins, A. (Hg.): Erosion and sediment yields in the changing environment. Proceedings of an IAHS International Commission on Continental Erosion symposium held at the Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS-Chengdu, China, 11-15 October 2012. Wallingford: IAHS Press (IAHS Publication, 356), S. 146–154.
- FISCHER, P.; HAAS, F.; CYFFKA, B. (2012b): Ökologische Flutungen an der Donau. Untersuchungen im Grenzbereich zwischen Hydrologie und Geomorphologie. In: WEILER, M. (Hg.): Wasser ohne Grenzen. Beiträge zum Tag der Hydrologie 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Freiburg (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 31.12). S. 153-158.
- FISHER, S. G.; LIKENS, G. E. (1973): Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: an integrative approach to stream ecosystem metabolism. In: *Ecological monographs* 43 (4), S. 421–439.
- FOECKLER, F.; SCHMIDT, H.; HERRMANN, T. (2010): Ökologische Untersuchungen im Isarmündungsgebiet: BfN, Bundesamt für Naturschutz.
- FOECKLER, F.; SCHMIDT, H. (2014): Anleitung zur Erhebung der Kolmation im Rahmen der Gewässerstrukturkartierung (GSK). Gesellschaft für Landschaftsökologie, Gewässerbiologie und Umweltplanung mbH.

- FREYTAG-LORINGHOFEN (2000): Renaturierung der Donauauen/ Auswertung Bodenkundlicher Daten. Hg. v. Verein für Forstliche Standortserkundung e.V.
- FRIEDKIN, J. F. (1945): Laboratory study of the meandering of alluvial rivers.
- FRISSELL, C. A.; LISS, W. J.; WARREN, C. E.; HURLEY, M. D. (1986): A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. In: *Environmental management* 10 (2), S. 199–214.
- FÜHRBÖTER, A. (1980): Strombänke (Grossriffel) und Dünen als Stabilisierungsformen.
- FULLER, I.; LARGE, A.; CHARLTON, M.; HERITAGE, G.; MILAN, D. (2003): Reach-scale sediment transfers: an evaluation of two morphological budgeting approaches. In: *Earth surface processes and landforms* 28 (8), S. 889–903.
- GALIA, T.; HRADECKÝ, J. (2011): Bedload transport and morphological effects of high-magnitude floods in small headwater streams-Moravskoslezské Beskydy Mts.(Czech Republic). In: *Journal of hydrology and hydromechanics* 59 (4), S. 238–250.
- GALLANDAT, J. D.; GOBAT, J. M.; ROULIER, C. (1993): Kartierung der Auengebiete von nationaler Bedeutung. In: *Schriftenreihe Umwelt* 199.
- GALLUSSER, W. A.; SCHENKER, A. (Hg.) (1992): Die Auen am Oberrhein. Ausmaß und Perspektiven des Landschaftswandels am südlichen und mittleren Oberrhein seit 1800 ; eine umweltdidaktische Aufarbeitung. Basel [u.a.]: Birkhäuser.
- GEBLER, R.-J.; LEHMANN, P. (2013): Naturnahes Fließgewässer am neuen Kraftwerk Rheinfeldern. In: *WasserWirtschaft* 103, S. 48–53.
- GELHAUS, M.; FISCHER, P. (in press): Untersuchungsgebiet. In: CYFFKA, B., BINDER, F., EWALD, J., GEIST, J., GRUPPE, A., HEMMER, I. ET AL. (Hg.): Neue dynamische Prozesse im Auenwald. Monitoring der Auenrenaturierung an der Donau zwischen Neuburg und Ingolstadt (Naturschutz und biologische Vielfalt).
- GEPP, J. (1985): Auengewässer als Oekozellen: Fluss-Altarme, Altwässer und sonstige Auen-Stillgewässer Österreichs. Bestand, Ökologie und Schutz. Wien: Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz (Grüne Reihe, 4).
- GERHARD, M.; REICH, M. (2001): Totholz in Fließgewässern. Empfehlungen zur Gewässerentwicklung. Heidelberg: WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung.
- GERKEN, B.; SCHWARZ, U.; PRIEBE, C. (1988): Auen. Verborgene Lebensadern der Natur. 1. Aufl. Freiburg im Breisgau: Rombach.
- GETIRANA, AUGUSTO C. V.; BONNET, M.-P.; ROTUNNO FILHO, OTTO C.; MANSUR, W. J. (2009): Improving hydrological information acquisition from DEM processing in floodplains. In: *Hydrol. Process.* 23 (3), S. 502–514.
- GLATTHAAR, D.; LIEDTKE, H. (1988): Untersuchungen im Wellheimer Trockental - Die Anlage des Schutterengtales (südl. Frankenalb). In: *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 62 Heft 1, S. 67–82.
- GOEBEL, H. (2006): Entwicklung einer Benchmarking-Methode für die Bewertung der Verbesserung von Gewässerstrukturen an Fließgewässern. München: Oldenbourg-Industrieverl (Mitteilungen / Institut für Wasserwesen, 96).

- GORDON, B. (2008): Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. TU Darmstadt.
- GORDON, N. D.; MCMAHON, T. A.; FINLAYSON, B. L.; GIPPEL, C. J.; NATHAN, R. J. (2013): Stream hydrology: an introduction for ecologists: John Wiley & Sons.
- GRAF, W. H.; ALTINAKAR, M. S. (2003): Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry. Repr. Chichester etc.: Wiley.
- GRAUL, H. (1943): Zur Morphologie der Ingolstädter Ausräumungslandschaft. Die Entwicklung des unteren Lechlaufes und des Donaumoosbeckens. Leipzig: Hirzel (Forschungen zur deutschen Landeskunde, 43).
- GRAUVOGEL, J. (2014): Terrestrisches Laserscanning im Vergleich zu photogrammetrischen verfahren bei der Erstellung computergestützter 3-D Modelle von gewässermorphologischen Strukturen. BSc-Arbeit. Weihenstephan Triesdorf, Triesdorf. Umweltsicherung.
- GRAW, M. (2008): Ökologische Bewertung von Fließgewässern. 4. Aufl. Bonn: Vereinigung Deutscher Gewässerschutz (Schriftenreihe der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. (VDG), 64).
- GRAW, M.; BORCHARDT, D. (2003): Ein Bach ist mehr als Wasser ... Materialien für einen fächerverbindenden, projektorientierten Unterricht zum Thema Ökologie und Schutz von Fließgewässern. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Ref. Öffentlichkeitsarbeit.
- GREGORY, K. J.; AM GURNELL; HILL, C. T. (1985): The permanence of debris dams related to river channel processes. In: *Hydrological Sciences Journal* 30 (3), S. 371–381.
- GREGORY, K. J.; AM GURNELL; HILL, C. T.; TOOTH, S. (1994): Stability of the pool-riffle sequence in changing river channels. In: *Regulated Rivers: Research & Management* 9 (1), S. 35–43.
- GREGORY, K. J.; DAVIS, R. J. (1992): Coarse woody debris in stream channels in relation to river channel management in woodland areas. In: *Regulated Rivers: Research & Management* 7 (2), S. 117–136.
- GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. (1973): Drainage basin form and process.
- GROSSMANN, M.; HARTJE, V.; MEYERHOFF, J. (2010): Ökonomische Bewertung naturverträglicher Hochwasservorsorge an der Elbe: Abschlussbericht des F+ E-Vorhabens (FKZ: 803 82 210)" Naturverträgliche Hochwasservorsorge an der Elbe und Nebenflüssen und ihr volkswirtschaftlicher Nutzen, Teil: Ökonomische Bewertung naturverträglicher Hochwasservorsorge an der Elbe und ihren Nebenflüssen" des Bundesamtes für Naturschutz: Bundesamt f. Naturschutz.
- GROVE, J. R.; CROKE, J.; THOMPSON, C. (2013): Quantifying different riverbank erosion processes during an extreme flood event. In: *Earth surface processes and landforms* 38 (12), S. 1393–1406.
- GUMNIOR, M. (2006): Zur spätquartären Flussgeschichte NE-Nigerias: morphologische, lithostratigraphische und pedologische Untersuchungen im Sedimentationsbereich der Tschadsee-Tributäre Komadugu Yobe und Komadugu Gana.
- GURNELL, A. M.; GREGORY, K. J. (1995): Interactions between semi-natural vegetation and hydrogeomorphological processes. In: *Geomorphology* 13 (1-4), S. 49–69.

- HAAS, F.; HECKMANN, T.; BECHT, M.; CYFFKA, B. (2011): Ground-based laserscanning—a new method for measuring fluvial erosion on steep slopes? In: *IAHS-AISH Publication*, S. 163–168.
- HAAS, F.; HECKMANN, T.; HILGER, L.; BECHT, M. (2012): Quantification and Modelling of debris Flows in the Proglacial Area of the Gepatschferner/ Austria using Ground-based Lidar. In: COLLINS, A. (Hg.): *Erosion and sediment yields in the changing environment. Proceedings of an IAHS International Commission on Continental Erosion symposium held at the Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS-Chengdu, China, 11-15 October 2012.* Wallingford: IAHS Press (IAHS Publication, 356).
- HABERSACK, H. M. (2000): The river-scaling concept (RSC): a basis for ecological assessments. In: JUNGWIRTH, M., MUHAR, S. UND SCHMUTZ, S. (Hg.): *Assessing the Ecological Integrity of Running Waters.* Dordrecht: Springer Netherlands, S. 49–60.
- HAFNER, T. (2008): *Uferrückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung: Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis: Techn. Univ., Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft im Inst. für Wasserwesen.*
- HAGEDORN, H.; DEIGELE, C. (2002): *Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie ; Rundgespräch am 22. Oktober 2001 in München. München: Pfeil (Rundgespräche der Kommission für Ökologie, 24).*
- HÄMMERLE, M.; FORBRIGER, M.; HÖFLE, B. (2013): *Multitemporale 3D-Erfassung und GIS-Analyse fluvial-geomorphologischer Prozesse mit terrestrischem Laserscanning.*
- HANCOCK, P. J.; BOULTON, A. J.; HUMPHREYS, W. F. (2005): Aquifers and hyporheic zones: Towards an ecological understanding of groundwater. In: *Hydrogeol J* 13 (1), S. 98–111.
- HARNISCHMACHER, S. (2002): *Fluvialmorphologische Untersuchungen an kleinen, naturnahen Fließgewässern in Nordrhein-Westfalen. Eine empirische Studie. Bochum: Geograph. Inst. der Ruhr-Univ. (Bochumer geographische Arbeiten, 70).*
- HARRES, H.-P. (1992): Zum Einfluß anthropogener Strukturen auf die Gewässersituation. Beispiele aus Hessen und Sardinien. In: BÖHM, H. R. UND DENEKE, M. (Hg.): *Wasser. Eine Einführung in die Umweltwissenschaften.* Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 91–118.
- HARVEY, A. M. (1984): Geomorphological response to an extreme flood: a case from southeast Spain. In: *Earth surface processes and landforms* 9 (3), S. 267–279.
- HECKMANN, T. (2006-2013): SAGA Modul Cut & Fill.
- HEILER, G.; HEIN, T.; SCHIEMER, F.; BORNETTE, G. (1995): Hydrological connectivity and flood pulses as the central aspects for the integrity of a river-floodplain system. In: *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 11 (3-4), S. 351–361.
- HEIN, S. (2003): *Zur Steuerung von Astreinigung und Dickenwachstum bei Esche (Fraxinus excelsior L.) und Bergahorn (Acer pseudoplatanus L.). Freiburger Forstliche Forschung – Schriftenreihe, Freiburg, Band 25: 263 p., Freiburg im Breisgau.*
- HEINE, K. (2001): *Fliessgewässer und Flussauen-geologisch-geomorphologische Betrachtungen. Eine Einführung zum Symposium, Fliessgewässer und Flussauen-schutzenswürdige Naturlandschaften und/oder moderne Wasserstrassen? In: Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband, S. 1–24.*

- HELLWEG, J. (2009): Die Hochwasservorhersagezentrale. Iller/Lech am WWA Kempten. Bund der Flußmeister Bayerns. In: *Die Flussmeister* 2009, S. 39–42.
- HENRICHFREISE, A. (2007a): Das auetypische Wasserregime als Grundlage für eine Reaktivierung von Auen. In Europäische Flussauen und Auewälder. In: *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* (70), S. 59–67.
- HENRICHFREISE, A. (2001): Zur Problematik von Stauhaltungen unter besonderer Berücksichtigung der Saale. In: *Nova Acta Leopoldina NF* 84 (319), S. 149–156.
- HERITAGE, G. L.; HETHERINGTON, D. (2007): Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. In: *Earth surface processes and landforms* 32 (1), S. 66–74.
- HERITAGE, G. L.; LARGE, A. R. G. (Hg.) (2009): Laser scanning for the environmental sciences. Chichester, West Sussex: Blackwell Pub.
- HERITAGE, G. L.; MILAN, D. J. (2009): Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel-bed river. In: *Geomorphology* 113 (1), S. 4–11.
- HERRMANN, T. (2001): Renaturierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Naturschutzfachliche/ökologische Bewertung der Renaturierungsmaßnahmen. Leader-II-Projekt. Unter Mitarbeit von ÖKON Gesellschaft für Landschaftsökologie. Landschaft+Plan Passau. Neuburg/Inn.
- HERRMANN, T.; KRÜGER, B.; ORTNER, A.; SCHMIDT, H.; WEISMEIER, U.; NEUMANN, S. (2004b): Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt. FFH-Verträglichkeitsuntersuchung. Landschaft+Plan. Neuburg/Inn.
- HERRMANN, T.; KRÜGER, B.; SCHMIDT, H.; WEISMEIER, U.; NEUMANN, S. (2004a): Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Umweltverträglichkeitsstudie. Landschaft+Plan. Neuburg/Inn.
- HICKS, D. M. (2012): Remotely sensed topographic change in gravel riverbeds with flowing channels. In: CHURCH, M., BIRON, P. UND ROY, A. (Hg.): Gravel bed rivers: Processes, tools, environments: John Wiley & Sons, S. 303–314.
- HIDAYAT, H.; VERMEULEN, B.; SASSI, M. G.; TORFS, P. J. J. F.; HOITINK, A. J. F. (2011): Discharge estimation in a backwater affected meandering river. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15 (8), S. 2717–2728.
- HILGART, M. (1995): Die geomorphologische Entwicklung des Altmühl- und Donautales im Raum Dietfurt-Kelheim-Regensburg im jüngeren Quartär. Trier: Deutsche Akademie für Landeskunde, Selbstverlag (Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 242).
- HILLENBRAND, T.; LIEBERT, J. (2001): Kosten-Wirksamkeitsanalyse für Gewässerstrukturmaßnahmen in Hessen. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe.
- HJULSTRÖM, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris: Inaugural Dissertation: Almqvist & Wiksells.
- HND (o.J.): Mittel/Höchstwerte Ingolstadt Luitpoldstraße / Donau. Hochwassernachrichtendienst. Hg. v. LfU Bayerisches Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter http://www.hnd.bayern.de/pegel/mittelhoechstwerte/pegel_mittelhoechstwerte.php?pgnr=10046105&standalone=, zuletzt geprüft am 07.10.2015.

- HODGE, R.; BRASINGTON, J.; RICHARDS, K. (2009b): Analysing laser-scanned digital terrain models of gravel bed surfaces: linking morphology to sediment transport processes and hydraulics. In: *Sedimentology* 56 (7), S. 2024–2043.
- HODGE, R.; BRASINGTON, J.; RICHARDS, K. (2009a): In situ characterization of grain-scale fluvial morphology using Terrestrial Laser Scanning. In: *Earth surface processes and landforms* 34 (7), S. 954–968.
- HÖFLE, B.; VETTER, M.; PFEIFER, N.; MANDLBURGER, G.; STÖTTER, J. (2009): Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. In: *Earth surface processes and landforms* 34 (12), S. 1635–1649.
- HOLLÄNDER, R.; WEIDNER, S.; SCHOCK, G.; PELZL, W.; LENK, T.; KÜHN, E. ET AL. (2010): Nachhaltiges regionales Flächenressourcenmanagement am Beispiel von Brachflächen der Deutschen Bahn AG – Integration von Flächen in den Wirtschaftskreislauf.
- HOLLAUS, M.; WAGNER, W.; KRAUS, K. (2005): Airborne laser scanning and usefulness for hydrological models. In: *Advances in geosciences* 5 (5), S. 57–63.
- HOOKE, J. M. (1979): An analysis of the processes of river bank erosion. In: *Journal of Hydrology* 42 (1-2), S. 39–62.
- HOOKE, J. M. (1980): Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. In: *Earth Surface Processes* 5 (2), S. 143–157.
- HORRITT, M. S.; BATES, P. D. (2002): Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. In: *Journal of Hydrology* 268 (1), S. 87–99.
- HOUBEN, P. (2002): Die räumlich-zeitlich veränderte Reaktion des fluvialen Systems auf jungquartäre Klimaänderungen. Eine Fallstudie aus der Hessischen Senke. In: *Diss. Univ. Frankfurt, FB Geowissenschaften*.
- HUDSON; FRASER (2005): Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement Part IV : The Mass Balance (or Dry Injection) Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement Part IV: The mass balance (or dry injection) method. In: *Streamline Watershed Bulletin* (9), S. 6–12.
- HUGO, R.; KINSINGER, C.; ASSMANN, R. (2012): Ermittlung der morphologischen Entwicklungsfähigkeit der Fließgewässer Hessens.
- HUMBORG, G. (1995): Typologische und morphologische Untersuchungen an Bergbächen im Buntsandstein-Odenwald: Inst. für Wasserbau und Kulturtechnik.
- ILLIES, J.; BOTOSANEANU, L. (1963): Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique: E. Schweizerbartsche.
- JABOYEDOFF, M.; OPIKOFER, T.; ABELLÁN, A.; DERRON, M.-H.; LOYE, A.; METZGER, R.; PEDRAZZINI, A. (2012): Use of LIDAR in landslide investigations: a review. In: *Natural hazards* 61 (1), S. 5–28.
- JÄGGI, M. (1979): Die Bildung von alternierenden Kiesbänken in geraden Flussläufen: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH.
- JÄGGI, M. (1983): Alternierende Kiesbänke: Untersuchungen über ihr Auftreten, den Zusammenhang mit der Bildung von Sohlenformen im Allgemeinen, sowie ihre Auswirkungen auf Ufererosion

- und Fließwiderstand: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETHZ (7208).
- JERZ, H. (1993): Das Eiszeitalter in Bayern. Erdgeschichte, Gesteine, Wasser, Boden. Stuttgart: Schweizerbart (Geologie von Bayern, 2).
- JERZ, H.; PETERS (2002): Flussdynamik der Donau bei Ingoldadt in vorgeschichtlicher, geschichtlicher und heutiger Zeeit, mit Ergebnissen zur Landschafts und vegetationsentwicklung (Rundgespräche der Kommission für Ökologie) (24), S. 95–108.
- JERZ, H.; SCHMIDT-KALER, H. (1999): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt 7234 Ingolstadt.
- JUNGWIRTH, M. (2003): Angewandte Fischökologie an Fließgewässern. Wien: Facultas (UTB, 2113).
- JUNGWIRTH, M.; HAIDVOGL, G.; MOOG, O.; MUHAR, S.; SCHMUTZ, S. (2003): Angewandte Fischökologie an Fließgewässern. Facultas Universitätsverlag, Wien. Wien: UTB.
- JUNGWIRTH, M.; SCHMUTZ, S.; WEISS, S. (1998): Fish migration and fish bypasses: Fishing News Books Oxford.
- JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. (1989): The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: *Canadian special publication of fisheries amd aquatic sciences* (106.1), S. 110–127.
- JUNK, W. J.; WANTZEN, K. M. (HG.) (2004): The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications-an update. Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries: Food and Agriculture Organization and Mekong River Commission, FAO Regional Office for Asia and the Pacific.
- JÜRGING, P.; PATT, H. (2005): Fließgewässer-und Auenentwicklung. Grundlagen und Erfahrungen. Berlin: Springer.
- JUTZI, B. (2007): Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulsen.
- KAHMEN, H. (2005): Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde. 20., völlig neu bearb. Aufl. Berlin, New York: De Gruyter (De-Gruyter-Lehrbuch).
- KALE, V. S.; HIRE, P. S. (2004): Effectiveness of monsoon floods on the Tapi River, India: role of channel geometry and hydrologic regime. In: *Geomorphology* 57 (3), S. 275–291.
- KALUSA, B. (2007): Talsperre Rosshaupten - Ein Energiespeicher unter veränderten Nutzungsinteressen. In: *WasserWirtschaft-Hydrologie, Wasserbau, Hydromechanik, Gewässer, Ökologie, Boden*.
- KASVI, E.; VAAJA, M.; ALHO, P.; HYYPPÄ, H.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; KUKKO, A. (2013): Morphological changes on meander point bars associated with flow structure at different discharges. In: *Earth surface processes and landforms* 38 (6), S. 577–590.
- KAUFMANN, S. (2012): Charakterisierung eines grossen Umgehungsgewässers (Aarekraftwerk Ruppoldingen) mit Fokus auf die Migrationsrichtung von Alet und Barbe. MSc-Arbeit. ETH Zürich, Zürich.
- KELLER, E. A. (1971): Areal sorting of bed-load material: the hypothesis of velocity reversal. In: *Geological Society of America Bulletin* 82 (3), S. 753–756.

- KELLER, E. A. (1972): Development of alluvial stream channels: a five-stage model. In: *Geological Society of America Bulletin* 83 (5), S. 1531–1536.
- KELLER, E. A.; FLORSHEIM, J. L. (1993): Velocity-reversal hypothesis: A model approach. In: *Earth surface processes and landforms* 18 (8), S. 733–740.
- KELLER, E. A.; MELHORN, W. N. (1978): Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. In: *Geological Society of America Bulletin* 89 (5), S. 723–730.
- KELLER, E. A.; SWANSON, F. J. (1979): Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. In: *Earth Surface Processes* 4 (4), S. 361–380.
- KELLERHALS, R. (1967): Stable channels with gravel-paved beds. In: *Journal of the Waterways and Harbors Division* 93 (1), S. 63–84.
- KERN, F. (2003): Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten: Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie, TU.
- KERN, F.; BRUHN, K.-C. (2010): Terrestrisches Laserscanning – Eine Quellenkritik. Erfassen, Modellieren, Visualisieren Von Handaufmass bis High Tech III 3D in der historischen Bauforschung, S. 1–7.
- KERN, K. (1994): Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung: Geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern: Springer.
- KERN, K. (2000): Konzept der integrierten Gewässerentwicklung - Einstufung der Entwicklungsfähigkeit von Gewässern. Auftraggeber. unveröffentlichte Projektstudie. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG).
- KERSTEN, T. P.; LINDSTAEDT, M. (2012): Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme—Workflow und praktische Beispiele: Terrestrisches Laserscanning.
- KIENAST, J.; HARING, D.-I. A. (2006): Untersuchung einer relativ zum terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i kalibrierten Kamera hinsichtlich Stabilität dieser Kalibrierung. Diplomarbeit. TU Wien, Wien. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- KINZEL, P. J.; LEGLEITER, C. J.; NELSON, J. M. (2013): Mapping River Bathymetry With a Small Footprint Green LiDAR: Applications and Challenges1. In: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 49 (1), S. 183–204.
- KINZEL, P. J.; WRIGHT, C. W.; NELSON, J. M.; BURMAN, A. R. (2007): Evaluation of an experimental LiDAR for surveying a shallow, braided, sand-bedded river. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 133 (7), S. 838–842.
- KIRCHER, A. (1665). In: *Mundus subterraneus* 2.
- KLEINSCHNITZ, M.; KRÖMER, E. (2003a): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. 7233 Neuburg a.d. Donau.
- KLEINSCHNITZ, M.; KRÖMER, E. (2003b): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 7233 Neuburg a.d. Donau.
- KLÖSCH, M.; BLAMAUER, B.; HABERSACK, H. (2015): Intra-event scale bar–bank interactions and their role in channel widening. In: *Earth surface processes and landforms*.

- KNIGHTON, D. (1998): Fluvial forms and processes. A new perspective. London, New York: Arnold; Oxford University Press.
- KNIPPERTZ, M. (2008): Renaturierung, Rekultivierung, Rehabilitation. In: Lennartz, G. (Hg.): Renaturierung: Programmatik und Effektivitätsmessung: Academic-Verlag, S. 4–9.
- KOENZEN, U. (2005): Fluss- und Stromauen in Deutschland: Typologie und Leitbilder. Ergebnisse des F+E-Vorhabens "Typologie und Leitbildentwicklung für Flussauen in der Bundesrepublik Deutschland" des Bundesamtes für Naturschutz : FKZ: 803 82 100. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (Angewandte Landschaftsökologie, 65).
- KÖHLER, U.; OTT, T.; GLÖCKNER, C. (2015): Betrieb einer Ultraschalldurchflussmessanlage Pegel Wolkenburg/Zwickauer Mulde. Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. In: *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen* (53), S. 241–253.
- KOHLSTOCK, P. (2011): Topographie. Methoden und Modelle der Landesaufnahme. Berlin, New York: De Gruyter (De Gruyter Studium).
- KONOLD, W.; BECK, R. (Hg.) (1996): Naturlandschaft - Kulturlandschaft. Die Veränderung der Landschaften nach der Nutzbarmachung durch den Menschen. Landsberg: ecomed.
- KOWOMA (2007): GPS-System. Erreichbare Genauigkeit -. Online verfügbar unter <http://www.kowoma.de/gps/Genauigkeit.htm>, zuletzt geprüft am 28.05.2015.
- KRAIER, W. (2004): Auenprogramm Bayern. Online verfügbar unter <http://www.lfu.bayern.de/natur/auenprogramm/index.htm>, zuletzt geprüft am 05.11.2015.
- KRAUS, K. (2004): Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7., vollst. bearb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: De Gruyter.
- KRAUS, K. (2007): Photogrammetry. Geometry from images and laser scans. 2nd [English] ed. Berlin, New York: Walter De Gruyter.
- KRAUSE, W.; HUEGIN, G. (1987): Oekologische Auswirkungen von Altarmverbundsystemen am Beispiel des Altrheinausbaus. In: *Natur und Landschaft. Zeitschrift fuer Umweltschutz und Landespflege. Stuttgart* 62 (1), S. 9.
- LAGUE, D.; BRODU, N.; LEROUX, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, S. 10–26.
- LANE, S. N.; CARBONNEAU, P. E. (2008): High resolution remote sensing for understanding instream habitat. In: WOOD, P. J., HANNAH, D. M. UND SADLER, J. P. (Hg.): Hydroecology and ecohydrology: past, present and future: Wiley Online Library, S. 185–204.
- LANE, S. N.; RICHARDS, K. S.; CHANDLER, J. H. (1995): Morphological Estimation of the Time-Integrated Bed Load Transport Rate. In: *Water Resour. Res.* 31 (3), S. 761–772.
- LANE, S. N.; WESTAWAY, R. M.; MURRAY HICKS, D. (2003): Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. In: *Earth surface processes and landforms* 28 (3), S. 249–271.
- LANG, P.; FREI, M.; EWALD, J. (2011): Waldgesellschaften und Standortabhängigkeit der Vegetation vor Beginn der Redynamisierung der Donauaue zwischen Neuburg und Ingolstadt.

- LANG, R. (1977): Die Entstehung des Donaumooses - in: Das Donaumoos bei Neuburg a. d. Donau. [Sonderdruck aus dem "Neuburger Kollektaneenblatt", Jahrbuch 130/1977 des Heimatvereins - Historischen Vereins Neuburg a. d. Donau]. Neuburg a. d. Donau: Heimatverein - Histor. Verein.
- LANGE, G.; LECHER, K. (1993): Gewässerregulierung, Gewässerpflege: naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern. 3. Aufl.
- LARGE, A. R. G.; HERITAGE, G. L. (2007): Terrestrial laser scanner based instream habitat quantification using a random field approach. In Proceedings of the 2007 Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPSoc2007).
- LAWA (2000): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer. 1. Aufl. Berlin: Kulturbuch-Verlag (Oberirdische Gewässer. Empfehlungen).
- LAWLER, D. M. (1986): River bank erosion and the influence of frost: a statistical examination. In: *Transactions of the Institute of British Geographers*, S. 227–242.
- LAWLER, D. M. (1993): The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. In: *Earth surface processes and landforms* 18 (9), S. 777–821.
- LAWLER, D. M.; GROVE, JR; COUPERHWAITE, J. S.; LEEKS, G. J. (1999): Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England. In: *Hydrological processes* 13 (7), S. 977–992.
- LDBV (Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung) (2013): Luftbild.
- LEGLEITER, C. J. (2012): Remote measurement of river morphology via fusion of LiDAR topography and spectrally based bathymetry. In: *Earth surface processes and landforms* 37 (5), S. 499–518.
- LEGLEITER, C. J.; KYRIAKIDIS, P. C.; McDONALD, R. R.; NELSON, J. M. (2011): Effects of uncertain topographic input data on two-dimensional flow modeling in a gravel-bed river. In: *Water resources research* 47 (3).
- LEIBUNDGUT, C.; HIRSIG, P. (1984): 3. Uferschutz. Ein Beitrag der Geographie. In: *Geogr. Helv.* 39 (2), S. 76–79.
- LEICA (2009): Leica GS09 GNSS Datenblatt. Leica Geosystems AG. Heerbrugg, Schweiz. Online verfügbar unter http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gpsgis/GS09%20GNSS/brochures-datasheet/Leica_GS09_GNSS_DS_de.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2015.
- LEOPOLD, L. B. (1964): Fluvial processes in geomorphology. San Francisco [u.a.]: Freeman.
- LEOPOLD, L. B.; MADDOCK JR, T. (1953): The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications.
- LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. (1957): River channel patterns: braided, meandering, and straight.
- LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. (1964): Fluvial process in geomorphology: Freeman.
- LFL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2014): Agrarmeteorologie_Bayern. Online verfügbar unter

- <http://www.am.rlp.de/Internet/global/startpage.nsf/87f72373f4207cacc1256df2003dcfff/bea5dcab417673b7c12574c2002b2006?OpenDocument>, zuletzt geprüft am 07.13.2015.
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2006): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Donaugebiet 2000
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2008a): Gewässerkundlicher Bericht Hochwasser August 2005,. München.
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2008b): Merkblatt Nr 5.4/1 Flussausstattung, Flussaufnahmen und deren Dokumentation.
- LFU (LANDESAMT FÜR UMWELT) (2003): Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 3 Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden Württemberg. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe (Oberirdische Gewässer gewässerökologie 78)..
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2011a): 47 Donaumoos. Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität.
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2011b): 48 Donautal um Ingolstadt. Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität.
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2013a): Gewässerentwicklungskonzepte (GEK). Merkblatt Nr. 5.1/3. LfU. Augsburg.
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2014): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Donaugebiet 2006
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2015a): Auenprogramm. Online verfügbar unter <http://www.lfu.bayern.de/natur/auenprogramm/index.htm>, zuletzt geprüft am 07.10.2015.
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT) (2015b): Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern. Online verfügbar unter <http://www.nid.bayern.de/>, zuletzt geprüft am 07.10.2015.
- LFU-GKD (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT-Gewässerkundlicher Dienst Bayern) (2015): Gewässerkundlicher Dienst Bayern. Online verfügbar unter <http://www.gkd.bayern.de/fluesse/abfluss/karten/index.php?thema=gkd&rubrik=fluesse&produkt=wasserstand&gknr=0>, zuletzt geprüft am 07.10.2015.
- LFW (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT) (1984): 100 Jahre Wasserbau am Lech zwischen Landsberg und Augsburg: Auswirkungen auf Fluss und Landschaft: Das Landesamt.
- LFW (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT) (2005): Einfluss von Maßnahmen der Gewässerentwicklung auf den Hochwasserabfluss. Materialien Nr.122.
- LICHUN, S. (2002): Analyse von Laserscanndaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Dissertation. TU Berlin, Berlin.
- LIGHT, H. M.; VINCENT, K. R.; DARST, M. R.; PRICE, F. D. (2006): Water-level decline in the Apalachicola River, Florida, from 1954 to 2004, and effects on floodplain habitats: US Geological Survey Reston.
- LISLE, T. (1979): A sorting mechanism for a riffle-pool sequence. In: *Geological Society of America Bulletin* 90 (7 Part II), S. 1142–1157.

- LISLE, T. (1987): Using "residual depths" to monitor pool depths independently of discharge. US Forest Service Research Notes PSW-394.
- LISLE, T. E. (1995): Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels. In: *Water resources research* 31 (4), S. 1107–1118.
- LÖLF & LWA (Landesanst. für Ökologie, Landschaftsentwicklung u. Forstplanung & Landesamt für Wasser u. Abfall) (1985): Bewertung des ökologischen Zustandes von Fließgewässern. 2. Aufl. Recklinghausen, Düsseldorf: Landesanst. für Ökologie, Landschaftsentwicklung u. Forstplanung NW; Landesamt für Wasser u. Abfall NW.
- LÜDERITZ, V.; JÜPNER, R. (2009): Renaturierung von Fließgewässern. In: Zerbe, S. und Wiegleb, G. (Hg.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa: Spektrum Akademischer Verlag, S. 95–124.
- LVG (Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation): DGM
- MADSEN, B. L.; TENT, L. (2000): Lebendige Bäche und Flüsse. Praxistipps zur Gewässerunterhaltung und Revitalisierung von Tieflandgewässern. Hamburg: Edmund-Siemers-Stiftung.
- MAGILLIGAN, F. J.; PHILLIPS, J. D.; JAMES, L. A.; GOMEZ, B. (1998): Geomorphic and sedimentological controls on the effectiveness of an extreme flood. In: *The Journal of geology* 106 (1), S. 87–96.
- MAIER, L. (1914): Das bayerische Donauebiet. München.
- MAKASKE, B. (2001): Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. In: *Earth-Science Reviews* 53 (3), S. 149–196.
- MANDLBURGER, G.; HÖFLE, B.; BRIESE, C.; RESSL, C.; OTEPKA, J.; HOLLAUS, M.; PFEIFER, N. (2009): Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 61 (7-8), S. 89–97.
- MANGELSDORF, J.; SCHEURMANN, K. (1980): Flussmorphologie. Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure. München, Wien: Oldenbourg.
- MARBS, A. (2003): Erfahrungen mit 3D Scanning am i3mainz. In: *Photogrammetrie, Laser scanner, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*, S. 73–82.
- MARGRAF, C. (2004): Die Vegetationsentwicklung der Donauauen zwischen Ingolstadt und Neuburg. Vegetationskundlich-ökologische Studie über den Wandel einer Auenlandschaft 30 Jahre nach Staustufenbau. *Hoppea, Denkschr. Regensb. Bot. Ges.* 65: 295–704.
- MARTI, C. (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen. Diss. ETH Zürich, Nr. 16899, 2006.-Ref.: H.-E. Minor.
- MARTIN, Y.; CHURCH, M. (1995): Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 20 (4), S. 347–361..
- MASON, D. C.; COBBY, D. M.; HORRITT, M. S.; BATES, P. D. (2003): Floodplain friction parameterization in two-dimensional river flood models using vegetation heights derived from airborne scanning laser altimetry. In: *Hydrological processes* 17 (9), S. 1711–1732.
- MATTHES, H. (1995): Umgehungs-bäche an großen Flüssen; probleme und Vorteile aus der Sicht des Kraftwerksbetreibers am Beispiel der Staustufe Vohburg. 9. Bad Godesberger SVK-Fischereitagung vom 24.bis 25. Januar 1995.

- MCKEAN, J.; ISAAK, D.; WRIGHT, W. (2009): Improving Stream Studies With a Small-Footprint Green Lidar. In: *Eos, Transactions American Geophysical Union* 90 (39), S. 341–342.
- MCKEAN, J. A.; ISAAK, D. J.; WRIGHT, C. W. (2008): Geomorphic controls on salmon nesting patterns described by a new, narrow-beam terrestrial-aquatic lidar. In: *Frontiers in Ecology and the Environment* 6 (3), S. 125–130.
- McMILLAN, H. K.; BRASINGTON, J. (2007): Reduced complexity strategies for modelling urban floodplain inundation. In: *Geomorphology* 90 (3), S. 226–243.
- MEHL, D. (2004): Machbarkeitsstudie für eine bundesweite Erfassung des ökologischen Zustands von Flußauen.
- MEYER, E. I. (2008): Wiederbesiedlung sommertrockener Gewässer-Hinweise zu Mechanismen und Potentialen der Strahlwirkung. In: *Schriften des Deutschen Rates für Landespflege*, Bd. 81, S. 106–112.
- MEYER, R. K. F.; SCHMIDT-KALER, H. (Hg.) (1991): Band 2: Durchs Urdonautal nach Eichstätt.
- MEYNEN, E.; SCHMITHÜSEN, J. (1953-1962): *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*. Bad Godesberg: Bundesanst. für Landeskunde und Raumforschung.
- MIALL, A. D. (1996): *The geology of fluvial deposits*:: Springer Verlag Berlin.
- MIDDLETON, B. (1999): *Wetland Restoration, Flood Pulsing, and Disturbance Dynamics*: Wiley.
- MIEHLICH, G. (2000): Eigenschaften, Genese und Funktionen von Böden in Auen Mitteleuropas. In: FRIESE, K., WITTER, B., RODE, M. UND MIEHLICH, G. (Hg.): *Stoffhaushalt von Auenökosystemen*: Springer Berlin Heidelberg, S. 3–17.
- MILAN, D. J. (2009): Terrestrial laser scan-derived topographic and roughness data for hydraulic modelling of gravel-bed rivers. In: HERITAGE, G. L., LARGE, ANDREW R. G UND CHARLTON, M. (Hg.): *Laser scanning for the environmental sciences*. Chichester, West Sussex: Blackwell Pub., S. 133–146.
- MILAN, D. J.; HERITAGE, G. L.; HETHERINGTON, D. (2007): Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. In: *Earth surface processes and landforms* 32 (11), S. 1657–1674.
- MILAN, D. J.; HERITAGE, G. L.; LARGE, A. R. G.; FULLER, I. C. (2011): Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation. In: *Geomorphology* 125 (1), S. 160–171.
- MILLAR, R. G. (2000): Influence of bank vegetation on alluvial channel patterns. In: *Water resources research* 36 (4), S. 1109–1118.
- MILLER, A. J. (1990): Flood hydrology and geomorphic effectiveness in the central Appalachians. In: *Earth surface processes and landforms* 15 (2), S. 119–134.
- MKULNV (MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN) (2010): Glossar. Online verfügbar unter <http://www.flussgebiete.nrw.de/index.php/Glossar>, zuletzt geprüft am 10.09.2015.
- MORGENSCHWEIS, G. (2010): *Hydrometrie. Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen*. Berlin, New York: Springer (VDI-Buch).

- MOSLEY, M. P. (1983): Response of braided rivers to changing discharge. In: *Journal of hydrology. New Zealand* 22 (1), S. 18–67.
- MOSSOP, B.; BRADFORD, M. J. (2006): Using thalweg profiling to assess and monitor juvenile salmon (*Oncorhynchus* spp.) habitat in small streams. In: *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63 (7), S. 1515–1525.
- MUELLER, J. E. (1968): An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes 1. In: *Annals of the Association of American Geographers* 58 (2), S. 371–385.
- MÜHLMANN, H. (2005): Handbuch für die Erhebung des hydromorphologischen Ist-Bestandes der Gewässer mit Einzugsgebieten zwischen 10 bis 100 km², Screeningmethode. BAW-Institut für Wassergüte. Wien.
- MÜLLER, K. (1982): The colonization cycle of freshwater insects. In: *Oecologia* 52 (2), S. 202–207.
- MULSOW, C.; SCHNEIDER, D.; ULLRICH, A.; STUDNICKA, N. (2004): Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems. In: *Photogrammetrie–Laserscanning–Optische 3D-Messtechnik (Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004)*, S. 108–113.
- MUNLV (MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ; DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN) (2003): Handbuch zur naturnahen Entwicklung von Fließgewässern. Band 1: Düsseldorf (1 & 2).
- MUÑOZ-CARPENA, R.; PARSONS, J. E.; GILLIAM, J. (1999): Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. In: *Journal of Hydrology* 214 (1-4), S. 111–129.
- MUTH, W. (2001): Hochwasserrückhaltebecken: Planung, Bau und Betrieb: expert verlag.
- NADOLNY, I. (1994): Morphologie und Hydrologie naturnaher Flachlandbäche unter gewässertypologischen Gesichtspunkten: gewässermorphologische und hydrologische Grundlagen für naturgemäßen Wasserbau und ökologische Gewässerentwicklung: Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Versuchsanstalt für Wasserbau" Theodor-Rehbock-Laboratorium", Universität Fridericiana zu Karlsruhe.
- NANSON, G. C.; CROKE, J. C. (1992): A genetic classification of floodplains. In: *Geomorphology* 4 (6), S. 459–486.
- NANSON, G. C.; HICKIN, E. J. (1983): Channel migration and incision on the Beatton River. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 109 (3), S. 327–337.
- NANSON, G. C.; KNIGHTON, A. D. (1996): Anabranching rivers: their cause, character and classification. In: *Earth surface processes and landforms* 21 (3), S. 217–239.
- NASERMOADDELI, M.; PASCHE, E. (2008): Application of terrestrial 3D laser scanner in quantification of the riverbank erosion and deposition. In: *Proceedings of Riverflow*, S. 3–5.
- NASERMOADDELI, M. H.; PASCHE, E. (2010): Modelling of undercutting and failure of non-cohesive riverbanks. In: *River Flow*.
- NAUDASCHER, E. (1992): *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. Zweite, verbesserte Auflage. Vienna: Springer Vienna.
- NEEF, E. (1968): Der Physiotope als Zentralbegriff der komplexen physischen Geographie. In: *Peterm. Mitt* 112, S. 15–23.

- NEITZEL, F.; KLONOWSKI, J. (2011): Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci* 38, S. 1–6.
- NELSON, P. A.; SMITH, J. A.; MILLER, A. J. (2006): Evolution of channel morphology and hydrologic response in an urbanizing drainage basin. In: *Earth surface processes and landforms* 31 (9), S. 1063–1079.
- NEWBOLD, J. D.; MULHOLLAND, P. J.; ELWOOD, J. W.; O'NEILL, R. V. (1982): Organic carbon spiralling in stream ecosystems. In: *Oikos*, S. 266–272.
- NEWSON, M. (1980): The geomorphological effectiveness of floods _ a contribution stimulated by two recent events in mid-Wales. In: *Earth Surf. Process.* 5 (1), S. 1–16.
- NIEDERMEIER, H. (1967): Die Entwicklung des Donaulaufes von der Lechmündung bis Kelheim, Facharbeit (Maschinenschrift). Facharbeit. Stadtarchiv Ingolstadt.
- NIEDERMEIER, H. (1996): Landschafts- und Flussgeschichte der Donau um Ingolstadt. Unter Mitarbeit von Stadt Ingolstadt (Hrsg.), Umweltamt. In: Umweltamt (Hg.): Ingolstädter Auwaldsymposium - Donauauen und Auwälder. Ingolstädter ökologische Schriften - Berichte vom 1. Ingolstädter Umweltforum am 27.06.1996. Ingolstadt.
- NIEHOFF, N. (1996): Ökologische Bewertung von Fließgewässerlandschaften: Grundlage für Renaturierung und Sanierung: Springer-Verlag.
- NIKON (2015): D700. Online verfügbar unter http://www.nikon.de/de_DE/product/discontinued/digital-cameras/2012/d700, zuletzt geprüft am 02.06.2015.
- NOTEBAERT, B.; VERSTRAETEN, G.; GOVERS, G.; POESEN, J. (2009): Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. In: *Earth surface processes and landforms* 34 (2), S. 217–231.
- NUA (2000): Gewässer ohne Wasser? Fachtagung Gewässer ohne Wasser? Ökologie, ; Ökologie, Management und Schutz Natürlich Temporärer Gewässer. Fachtagung. Unter Mitarbeit von Ute Dröge. 1. Aufl. Recklinghausen: NUA (Natur- und Umweltschutz-Akademie des Landes Nordrhein-Westfalen, NUA Seminarbericht Band 5).
- OFENBÖCK, T.; GRAF, W.; HARTMANN, A.; HUBER, T.; LEITNER, P.; STUBAUER, I.; MOOG, O. (2011): Abschätzung des ökologischen Zustandes von Stauen auf Basis von Milieufaktoren. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.
- O'NEAL, M. A.; PIZZUTO, J. E. (2011): The rates and spatial patterns of annual riverbank erosion revealed through terrestrial laser-scanner surveys of the South River, Virginia. In: *Earth surface processes and landforms* 36 (5), S. 695–701.
- O'NEILL, M. P.; ABRAHAMS, A. D. (1984): Objective identification of pools and riffles. In: *Water resources research* 20 (7), S. 921–926.
- ORGHIDAN, T. (1959): Ein neuer Lebensraum des unterirdischen Wassers: der hyporheische Biotop. In BORCHERT, D. 1996. In: *Arch. Hydrobiol* 55 (3), S. 392–414.
- OSBORNE, L. L.; KOVACIC, D. A. (1993): Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management. In: *Freshwater Biol* 29 (2), S. 243–258.
- OSMAN, A. M.; THORNE, C. R. (1988): Riverbank stability analysis. I: Theory. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 114 (2), S. 134–150.

- OTTO, A. (1991): Grundlagen einer morphologischen Typologie der Bäche: EV (Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, 180).
- OTTO, A. (1996): Renaturierung als Teil der ökologischen Fließgewässersanierung. In: Tönsmann, F. (Hg.): Sanierung und Renaturierung von Fließgewässern. Grundlagen und Praxis. Kassel: Herkules-Verl. (Wasserbau Kassel. Reihe Mitteilungen, H. 6), S. 25–34.
- PALMER, M.; ALLAN, J. D.; MEYER, J.; BERNHARDT, E. S. (2007): River restoration in the twenty-first century: data and experiential knowledge to inform future efforts. In: *Restoration Ecology* 15 (3), S. 472–481.
- PALMER, M. A.; BERNHARDT, E. S.; ALLAN, J. D.; LAKE, P. S.; ALEXANDER, G.; BROOKS, S. ET AL. (2005): Standards for ecologically successful river restoration. In: *Journal of applied ecology* 42 (2), S. 208–217.
- PARKER, C.; SIMON, A.; THORNE, C. R. (2008): The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. In: *Geomorphology* 101 (4), S. 533–543.
- PARKER, G. (1976): On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. In: *Journal of Fluid Mechanics* 76 (03), S. 457–480.
- PARKER, G. (1979): Hydraulic geometry of active gravel rivers. In: *Journal of the Hydraulics Division* 105 (9), S. 1185–1201.
- PARKER, G. (1983): Theory of meander bend deformation.
- PARODI, O. (2008): Technik am Fluss. Philosophische und kulturwissenschaftliche Betrachtungen zum Wasserbau als kulturelle Unternehmung. München: Oekom-Verl (Hochschulschriften zur Nachhaltigkeit, 41).
- PATT, H.; GONSOWSKI, P. (2011): Wasserbau. Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. In: *Wasserbau*.
- PATT, H.; JÜRGING, K.; KRAUS, W. (Hg.) (2011): Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. 4., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- PENCK, A. (1894): Morphologie der erdoberfläche: J. Engelhorn.
- PETER, W.; STAB, S. (2001): Bedeutung und Grenzen von Höhenmodellen für Indikatorsysteme in Auen. In: Indikation in Auen. Präsentation der Ergebnisse aus dem RIVA-Projekt. UFZ-Bericht 8/2001. Leipzig, Halle.
- PETERS, M.; JERZ, H.; KÜSTER, H. (2002): Entwicklung und Wandel einer Flusslandschaft (Donautal bei Ingolstadt) seit der letzten Eiszeit. Arbeitskreis Vegetationsgeschichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft. 12. Jahrestreffen vom 25. – 28. Oktober 2002 in Greifswald, 14.
- PETERSEN, M. (2006): Ist Laserscanning wirtschaftlich einsetzbar? In: Niemeier, W. und Schäfer, M. (Hg.): Terrestrisches Laser-Scanning. (TLS 2006) ; Beiträge zum 72. DVW-Seminar am 9. und 10. November 2006 in Fulda. Augsburg: Wißner-Verl (Schriftenreihe des DVW, 51).
- PETTS, G. E.; MÖLLER, H.; ROUX, A. L. (Hg.) (1989): Historical change of large alluvial rivers: Western Europe. Chichester [u.a.]: Wiley.
- PFEIFER, N. (2003): Oberflächenmodelle aus Laserdaten. In: *Vermessung & Geoinformation* 91 (4), S. 243–252.

- PFEIFER, T.; SCHMITT, R. (2010): Fertigungsmesstechnik. 3., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg.
- PFLEGERL, M. (2008): Laserscanning und 3D-Modellierung von ingenieurbioologischen Bauelementen. Masterarbeit. BOKU-Universität für Bodenkultur, Wien.
- PHILLIPS, J. D. (2002): Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin. In: *Journal of Hydrology* 269 (3), S. 236–250.
- PICCO, L.; MAO, L.; CAVALLI, E.; BUZZI, E.; RIGON, E.; MORETTO, J. ET AL. (2012): Using a Terrestrial Laser Scanner to assess the morphological dynamics of a gravel-bed river. In: *IAHS-AISH Publication* (356), S. 428–437.
- PICKETT, S. T.; WHITE, P. S. (1985): The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Orlando, Fla.: Academic press.
- PONCE, V. M. (1989): Engineering hydrology: Principles and practices: Prentice Hall. Online verfügbar unter <http://manningsn.sdsu.edu/onlinegumbel.php>.
- POOLE, G. C. (2002): Fluvial landscape ecology: addressing uniqueness within the river discontinuum. In: *Freshwater biology* 47 (4), S. 641–660.
- POTT, R.; REMY, D. (2000): Gewässer des Binnenlandes, Ökosysteme Mitteleuropas aus geobotanischer Sicht. In: *Eugen Ulmer, Stuttgart*.
- POTTGIESSER, T.; EHLERT, T. (2012): Typisierung potamaler Altgewässer in Sachsen-Anhalt. Projekt im Auftrag des Landesbetriebs für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt. Essen.
- PROKOP, A.; SINGER, F. (2011): Terrestrisches Laser scannen von Geschiebeumlagerungen am Feistritzbach. In: *Institut für Alpine Naturgefahren der Universität für Bodenkultur, Wien, IAN-Report* 129.
- PROMINSKI, M.; STOKMAN, A.; STIMBERG, D.; VOERMANEK, H.; ZELLER, S. (2012): Fluss. Raum. Entwerfen: Planungsstrategien für urbane Fließgewässer. Basel: Walter De Gruyter.
- PYRCE, R. S.; ASHMORE, P. E. (2003): Particle path length distributions in meandering gravel-bed streams: Results from physical models. In: *Earth surface processes and landforms* 28 (9), S. 951–966.
- RAU, J. Y.; JHAN, J. P.; LO, C. F.; LIN, Y. S. (2011): Landslide mapping using imagery acquired by a fixed-wing UAV. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci* 38, S. 1-C22.
- RAUTHE, M. (2014): Kapitel Starkniederschlag. Forschungsfeld Naturgefahren, DWD/GFZ-Publikation, S. 24–33.
- REQUENA, P. (2008): Seitenerosion in kiesführenden Flüssen: Prozessverständnis und quantitative Beschreibung: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule.
- RESHETYUK, Y. (2009): Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Dissertation, Stockholm. Royal Institute of Technology (KTH).
- RESNIK, B. (2002): Praktische Untersuchungen zur Genauigkeit von Flächenmessungen mit Handheld-GPS-Empfängern. In: *AVN*, 10, 346–351.

- RESOP, J. P.; HESSION, W. C. (2010): Terrestrial Laser Scanning for Monitoring Streambank Retreat: Comparison with Traditional Surveying Techniques. In: *J. Hydraul. Eng.* 136 (10), S. 794–798.
- REY, P. (2004): Ökologische Aspekte der Gewässerentwicklung. Alpenrheinzuflüsse und Bäche im Rheintal. Hg. v. Internationale Regierungskommission Alpenrhein (IRKA). HYDRA.
- RICHARDS, K.; BRASINGTON, J.; HUGHES, F. (2002): Geomorphic dynamics of floodplains: ecological implications and a potential modelling strategy. In: *Freshwater Biol* 47 (4), S. 559–579.
- RICHARDS, K. S. (1976a): The morphology of riffle-pool sequences. In: *Earth Surface Processes* 1 (1), S. 71–88.
- RICHARDS, K. S. (1982): Rivers. Form and process in alluvial channels. London, New York: Methuen.
- RIEGL (o. J.): General-Information. Online verfügbar unter http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/General-Information-Distancemeter.pdf, zuletzt geprüft am 02.06.2015.
- RIEGL (2007): Long Range & High Accuracy 3D Terrestrial Laser Scanner LMS-Z420i. Online verfügbar unter http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_Z420i_03-05-2010.pdf, zuletzt geprüft am 02.06.2015.
- RIEGL (2010): Long Range & High Accuracy 3D Terrestrial Laser Scanner LMS-Z420i. Data sheet, LMS-Z420i, 03/05/2010. Online verfügbar unter http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_Z420i_03-05-2010.pdf, zuletzt geprüft am 02.06.2015.
- RINGLER, A. (1995): Landschaftspflegekonzept Bayern. München: Bayer. Akad. für Naturschutz und Landschaftspflege.
- RMD (1967): Donaustufe Bergheim Erläuterungsbericht zum Bauentwurf. Hg. v. Rhein-Main-Donau AG (RIVID). Donau Wasserkraft AG. München.
- RMD CONSULT (2004a): Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt Teil A 2 D WSP-Berechnungen.
- RMD CONSULT (2004b): Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt Teil B Grundwassermodellierung.
- RONI, P. (2005): Monitoring stream and watershed restoration. Bethesda, Md: American Fisheries Society.
- ROSGEN, D. L. (1994): A classification of natural rivers. In: *Catena* 22 (3), S. 169–199.
- RUISINGER, V. (2014): Der Einfluss von Totholz und umgestürzten Bäumen auf die Strömungsverhältnisse und Gewässermorphologie im neuen Umgebungsbach im Auwald zwischen Neuburg und Ingolstadt. MSc-Arbeit. KU-Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt.
- RYAN, J. A.; ULRICH, J. M. (2010): xts: Extensible Time Series, 2010. In: URL <http://CRAN.R-project.org/package=xts>. R package version 0.7-0.
- RYCHKOV, I.; BRASINGTON, J.; VERICAT, D. (2012): Computational and methodological aspects of terrestrial surface analysis based on point clouds. In: *Computers & Geosciences* 42, S. 64–70.

- SAYNOR, M. J.; ERSKINE, W. D. (2006): Spatial and temporal variations in bank erosion on sand-bed streams in the seasonally wet tropics of northern Australia. In: *Earth surface processes and landforms* 31 (9), S. 1080–1099.
- SCHAEFER, I. (1966): Der Talknoten von Donau und Lech. In: *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft München*, Bd. 51, S. 59–111.
- SCHÄLCHLI, U. (1991): Morphologie und Strömungsverhältnisse in Gebirgsbächen: ein Verfahren zur Festlegung von Restwasserabflüssen. In: *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich* (113), S. 7–112.
- SHELLMANN, G. (1990): Fluviale Geomorphodynamik im jüngeren Quartär des unteren Isar- und angrenzenden Donautales. Düsseldorf: Geographisches Inst (Düsseldorfer geographische Schriften, 29).
- SCHERLE, J. (1999): Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen. Karlsruhe: Inst. für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Univ (Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik).
- SCHIELEIN, P. (2012): Jungquartäre Flussgeschichte des Lechs unterhalb von Augsburg und der angrenzenden Donau. *Bamberger Geographische Schriften - Sonderfolge*, 9. Dissertation, Bamberg.
- SCHIEMER, F.; BAUMGARTNER, C.; TOCKNER, K. (1999): Restoration of floodplain rivers: The 'Danube restoration project'. In: *Regulated Rivers: Research & Management* 15 (1-3), S. 231–244.
- SCHLEGEL (2000a): Renaturierung der Donau Auen. Auswertung der Grundwassermessdaten.
- SCHLEGEL (2000b): Renaturierung der Donau Auen. Hochwasser-Abflusssituation im Auwald.
- SCHLEGEL (2000c): Renaturierung der Donau Auen. Hydraulische Berechnung des Umgehungsgerinnes.
- SCHLEGEL (2000d): Renaturierung der Donau Auen. Hochwasserfixierung im Auwald.
- SCHLEGEL (2001a): Renaturierung der Donau Auen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Stichtagsmessung vom 07.06.2001. 1. Nachtrag zum Bericht Auswertung der Grundwassermessdaten.
- SCHLEGEL (2001b): Renaturierung der Donau Auen. Statistische Auswertung der Hochwasserabflüsse der Donau für die ökologischen Flutungen. 1. Nachtrag zum Bericht Hochwasserabflusssimulation.
- SCHLEGEL (2001bb): Renaturierung der Donau Auen. Rückstau bei ökologischen Flutungen. 2. Nachtrag zum Bericht "Hochwasser-Abflusssituation".
- SCHLEGEL (2001c): Renaturierung der Donau Auen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Untersuchungen für ein Umgehungsgerinne nördlich der Donau. 1. Nachtrag zum Bericht "Umgehungsgerinne".
- SCHLEGEL (2004): Auendynamisierung zwischen Neuburg und Ingolstadt. Planfeststellung §31 WHG. Unveröffentlichter Erläuterungsbericht plus Anlagen.
- SCHLÜTER, O. (1919): Die Stellung der Geographie des Menschen in der erdkundlichen Wissenschaft: Mittler.

- SCHMAUTZ, M. (2003): Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke: Entwicklung und Untersuchungen an einem numerischen Modell: Lehrstuhl u. Versuchsanstalt für Wasserbau u. Wasserwirtschaft d. Techn. Univ. München.
- SCHMITHÜSEN, J. (1976): Allgemeine Geosynergetik. Grundlagen d. Landschaftskunde. 1. Aufl. Berlin, New York: De Gruyter (Lehrbuch der allgemeinen Geographie, Bd. 12).
- SCHNEIDER, D.; MAAS, H.-G. (2007): Integrated bundle adjustment of terrestrial laser scanner data and image data with variance component estimation. In: *The Photogrammetric Journal of Finland* 20, S. 5–15.
- SCHOLZ, M.; HENLE, K.; DZIOCK, F.; STAB, S.; FOCKLER, F. (Hg.) (2009): Entwicklung von Indikationssystemen am Beispiel der Elbaue. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- SCHOLZ, M.; MEHL, D.; SCHULZ-ZUNKEL, C.; KASPERIDUS, H. D.; BORN, W.; HENLE, K. (2012): Ökosystemfunktionen von Flussaue. In: *Analyse und Bewertung von Hochwasserretention, Nährstoffrückhalt, Kohlenstoffvorrat, Treibhausgasemissionen und Habitatfunktion. Naturschutz und Biologische Vielfalt* 124 (2).
- SCHOLZ, M.; SCHWARTZ, R.; WEBER, M. (2005): Flusslandschaft Elbe-Entwicklung und heutiger Zustand. Nutzung und Veränderung durch den Menschen. In: Scholz, M. (Hg.): Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Berlin: Weißensee-Verl, S. 5–48.
- SCHUMM, S. A. (1960): The shape of alluvial channels in relation to sediment type. In: *US Geol. Surv. Prof. Pap* 352.
- SCHUMM, S. A. (1968): River adjustment to altered hydrologic regimen-Murrumbidgee River and paleochannels, Australia. US Govt. Print. Off.
- SCHUMM, S. A. (1977): The fluvial system. New York: Wiley.
- SCHUMM, S. A. (1981): Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications.
- SCHUMM, S. A. (1985): Patterns of alluvial rivers. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 13, S. 5.
- SCHUMM, S. A. (1998): To Interpret the Earth: Ten ways to be wrong: Cambridge University Press.
- SCHUMM, S. A.; LICHTY, R. W. (1965): Time, space, and causality in geomorphology. In: *American Journal of Science* 263 (2), S. 110–119.
- SCHÜRCH, P.; DENSMORE, A. L.; ROSSER, N. J.; LIM, M.; MCARDELL, B. W. (2011): Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel. In: *Earth surface processes and landforms* 36 (14), S. 1847–1859.
- SCHÜTT, B. (1994): 2 Ermittlung des Stoffhaushaltes. Datenerhebung und Datenauswertung am Beispiel des Kalltales/Eifel. In: BARSCH, D., MÄUSBACHER, R., PÖRTGE, K.-H. UND SCHMIDT, K.-H. (Hg.): Messungen in fluvialen Systemen. Feld- und Labormethoden zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushaltes. Berlin, New York: Springer-Verlag, S. 27–48.
- SCHWALLER, G.; TÖLLE, U. (2005): Einfluss von Maßnahmen der Gewässerentwicklung auf den Hochwasserabfluss. In: *Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München*.
- SCHWARTZ, R.; GRÖNGRÖFT, A.; MIEHLICH, G. (2000): Charakterisierung und Wasserhaushalt typischer Böden im Überschwemmungsbereich der unteren Mittellelbe. In: FRIESE, K., WITTER, B., RODE,

- M. UND MIEHLICH, G. (Hg.): Stoffhaushalt von Auenökosystemen: Springer Berlin Heidelberg, S. 65-78.
- SCHWEVERS, U.; ADAM, B. (2010): Bewertung von Auen Anhand der Fischfauna. Machbarkeitsstudie. Hg. v. BfN.
- SCHWOERBEL, J. (1999): Zur Geschichte der Fließgewässerforschung. In: *Laufener Seminarbeiträge* 4 (99), S. 27–33.
- SEAR, D. A. (1996): Sediment transport processes in pool–riffle sequences. In: *Earth surface processes and landforms* 21 (3), S. 241–262.
- SEIFERT, K.; HARTMANN, F. (1995): Gestaltungskriterien für Umleitungsbäche und ihre ökologische/fischereiliche Ausgleichsfunktion. 9. SVK – Fischereitagung, Bonn - Bad Godesberg.
- SER (2004): Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group SER International Primer on Ecological Restoration | resources | Society for Ecological Restoration. The SER International Primer on Ecological Restoration.
- SHAN, J.; TOTH, C. K. (2009): Topographic laser ranging and scanning. Principles and processing. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- SHIELDS, J. R.; KNIGHT, S.; STOFLETH, J. M.; WREN, D. G. (2009): Towards a basis for designing backwater and side channel restorations. Proceedings of the 33rd IAHR Congress Madrid.
- SIGRIST, P.; COPPIN, P.; HERMY, M. (1999): Impact of forest canopy on quality and accuracy of GPS measurements. In: *International Journal of Remote Sensing* 20 (18), S. 3595–3610.
- SIMON, A.; CURINI, A.; DARBY, S. E.; LANGENDOEN, E. J. (2000): Bank and near-bank processes in an incised channel. In: *Geomorphology* 35 (3-4), S. 193–217.
- SIMONS, D. B.; ALBERTSON, M. L. (1963): Uniform water conveyance channels in alluvial material. In: *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 128 (1), S. 65–106.
- SMETTAN, K.; BAUER, K. (2004): Baugrundgutachten. dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt.
- SOMMER, A.; KERSTEN, T. (2007): 3D–Erfassung und Modellierung des Nordportals des alten Damms in Marib/Jemen durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Diplomarbeit Universität Hamburg.
- SOMMERHÄUSER, M. (2005): Gewässer ohne Wasser?– Ökologie und Management temporärer Gewässer. Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung 2005.
- STAMMEL, B.; CYFFKA, B.; GEIST, J.; MÜLLER, M.; PANDER, J.; BLASCH, G. ET AL. (2012): Floodplain restoration on the Upper Danube (Germany) by re-establishing water and sediment dynamics: a scientific monitoring as part of the implementation. In: *River Systems* 20 (1), S. 55–70.
- STAREK, M. J.; MITASOVA, H.; WEGMANN, K. W.; LYONS, N. (2013): Space-time cube representation of stream bank evolution mapped by terrestrial laser scanning. Geosci Remote Sensing Lett. In: *IEEE PP* (99), S. 1109.
- STATZNER, B.; GORE, J. A.; RESH, V. H. (1988): Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications. In: *Journal of the North American Benthological Society*, S. 307–360.

- STATZNER, B.; HIGLER, B. (1986): Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns. In: *Freshwater biology* 16 (1), S. 127–139.
- STEFANOVIC, J. R.; BRYAN, R. B. (2007): Experimental study of rill bank collapse. In: *Earth surface processes and landforms* 32 (2), S. 180–196.
- STEINHARDT, U., BLUMENSTEIN, O., BARSCH, H. (2011). Lehrbuch der Landschaftsökologie. Springer-Verlag.
- STEWART-OATEN, A.; MURDOCH, W. W.; PARKER, K. R. (1986): Environmental impact assessment: "Pseudoreplication" in time? In: *Ecology* 67 (4), S. 929–940.
- STIMM, E. M. (2008): Pedologische Untersuchungen und Mächtigkeitkartierung von holozänen Auensedimenten der Donau mit GIS. Diplomarbeit. LMU, München.
- STMUV (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2014): Entwurf des Bewirtschaftungsplans für den bayerischen Anteil am Flussgebiet Donau Bewirtschaftungszeitraum 2016–2021. Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. München.
- STOCKER, C. (2014): Untersuchungen der eigendynamischen Entwicklung eines Prallhangs durch ein HQ5 bis HQ10 anhand von TLS Messungen in einem naturnah angelegten Fließgewässer. Bachelorarbeit. KU-Eichstätt, Eichstätt
- STOJIC, M.; CHANDLER, J.; ASHMORE, P.; LUCE, J. (1998): The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 64 (5), S. 387–395.
- STOTT, T. (2013): Review of research in fluvial geomorphology 2010–2011. In: *Progress in Physical Geography* 37 (2), S. 248–258.
- STURGES, H. A. (1926): The choice of a class interval. In: *Journal of the American Statistical Association* 21 (153), S. 65–66.
- TAKAHASHI, G.; GOMI, T.; SASA, K. (2008): Hyporheic flow as a potential geomorphic agent in the evolution of channel morphology in a gravel-bed river. In: *Catena* 73 (3), S. 239–248.
- TAYLOR, J. R. (1982): An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements, 327 pp. In: *Univ. Sci. Books, Mill Valley, Calif.*
- THOMAS, J. (1993): Untersuchungen zur holozänen fluvialen Geomorphodynamik an der oberen Oberweser. Göttingen: Erich Goltze (Göttinger Geographische Abhandlungen, 98).
- THOMAS, P.; GARBE, F. (2003): Suchen und Kartieren: Erfahrungen mit GPS-Geräten in der Naturschutzpraxis.
- THOMPSON, C.; CROKE, J. (2013): Geomorphic effects, flood power, and channel competence of a catastrophic flood in confined and unconfined reaches of the upper Lockyer valley, southeast Queensland, Australia. In: *Geomorphology* 197, S. 156–169.
- THORNE, C. R. (1982): Processes and mechanism of River Bank Erosion. In: HEY, R. D., BATHURST, J. C. UND THORNE, C. R. (Hg.): *Gravel-bed rivers*: Wiley, S. 227–272.
- THORNE, C. R. (1997): Channel types and morphological classification. In: THORNE, C. R., HEY, R. D. UND NEWSON, M. D. (Hg.): *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*: John Wiley & Sons Ltd, S. 175–221.

- THORNE, C. R.; TOVEY, N. K. (1981): Stability of composite river banks. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 6 (5), S. 469–484.
- THORNES, J. B. (1977): Hydraulic geometry and channel change. In: GREGORY, K. J. (Hg.): *River channel changes*: John Wiley & Sons, S. 91–100.
- TILLMANN, W. (1977): Zur Geschichte von Urmain und Urdonau zwischen Bamberg, Neuburg/Donau und Regensburg. Köln (Geologisches Institut <Köln>: Sonderveröffentlichungen des Geologischen Instituts der Universität zu Köln, 30).
- TLUG (THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE) (2010): *Gewässerrahmenplan. Glossar*.
- TOCKNER, K.; MALARD, F.; WARD, J. V. (2000): An extension of the flood pulse concept. In: *Hydrological processes* 14 (16-17), S. 2861–2883.
- TOCKNER, K.; PUSCH, M.; GESSNER, J.; WOLTER, C. (2011): Domesticated ecosystems and novel communities: challenges for the management of large rivers. In: *Ecohydrology & Hydrobiology* 11 (3), S. 167–174.
- TOCKNER, K.; STANFORD, J. A. (2002): Riverine flood plains: present state and future trends. In: *Environmental conservation* 29 (03), S. 308–330.
- TOMASI DI LAMPEDUSA, G. (1959). *Der Leopard*, aus dem Italienischen von Charlotte Birnbaum, 6. Aufl., München: Piper.
- TÖNSMANN, F. (Hg.) (1996): *Sanierung und Renaturierung von Fließgewässern. Grundlagen und Praxis*. Kassel: Herkules-Verl. (Wasserbau Kassel. Reihe Mitteilungen, H. 6).
- TOWNSEND, C. R. (1989): The patch dynamics concept of stream community ecology. In: *Journal of the North American Benthological Society*, S. 36–50.
- TRÄBING, K. (1996): Flußmorphologische Aspekte der Leitbildbindung. In: TÖNSMANN, F. (Hg.): *Sanierung und Renaturierung von Fließgewässern. Grundlagen und Praxis*. Kassel: Herkules-Verl. (Wasserbau Kassel. Reihe Mitteilungen, H. 6), S. 57–78.
- TRIMBLE, S. W. (1997): Stream channel erosion and change resulting from riparian forests. In: *Geology* 25 (5), S. 467–469.
- TURNER, K.; GEORGIU, S.; FISHER, B. (2008): *Valuing Ecosystem Services: The Case of Multi-functional Wetlands*.
- UMSTÄDTER, K. (2015): *Bodenerosion nach Brandereignissen auf La Palma*. Dissertation. KU-Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt.
- UNDERWOOD, A. J. (1991): Beyond BACI: experimental designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural populations. In: *Marine and Freshwater Research* 42 (5), S. 569–587.
- VANNOTE, R. L.; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R.; CUSHING, C. E. (1980): The river continuum concept. In: *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37 (1), S. 130–137.
- VETTER, T. (2008): *Hochwasserbegleitende Sohldynamik eines großen Flachlandflusses (Vereinigte Mulde, Sachsen-Anhalt) unter besonderer Berücksichtigung von gestörten Transportverhältnissen*. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald.

- VIESER, H. (Hg.) (1999): Auswirkungen der ökologischen Flutungen der Polder Altenheim. Ergebnisse des Untersuchungsprogramms 1993 - 1996. Lahr: Gewässerdir. Südl. Oberrhein/Hochrhein (Materialien zum Integrierten Rheinprogramm, 9).
- VISCHER, D.; HAGER, W. H. (1992): Hochwasserrückhaltebecken: VdF, Verlag d. Fachvereine an d. schweizer. Hochschulen u. Techniken.
- VOSELMAN, G.; MAAS, H.-G. (Hg.) (2010): Airborne and terrestrial laser scanning. Dunbeath: Whittles Publishing.
- WAF (1998): Standortoperat-WAF Donauauwald. Ingolstadt, S. 140.
- WAGNER, B. (2009): Wechselwirkung von Hochwasserabflüssen und morphodynamischen Prozessen. Diplomarbeit. BOKU-Universität für Bodenkultur, Wien
- WALENTOWSKI, H.; EWALD, J.; FISCHER, A.; KÖLLING, C.; TÜRK, W. (2004): Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns. Freising: Geobotanica-Verlag.
- WARD, J. V. (1989): The four-dimensional nature of lotic ecosystems'. In: *Journal of the North American Benthological Society* 8 (1), S. 2–8.
- WARD, J. V.; STANFORD, J. A. (1983): The serial discontinuity concept of lotic ecosystems. In: *Dynamics of lotic ecosystems* 10, S. 29–42.
- WARD, J. V.; STANFORD, J. A. (1995): The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers. In: *Regulated Rivers: Research & Management* 10 (2-4), S. 159–168.
- WASSERMANN, G. (1999): 10 Jahre Gießgang Greifenstein: eine interdisziplinäre Gesamtstudie eines Hinterlandbewässerungssystems: Österr. Elektrizitätswirtschafts-Aktienges. (Verbund).
- WEBER-BLASCHKE, G.; HEITZ, R.; BLASCHKE, M.; AMMER, C. (2009): Wiederaufforstung mit Edellaubbäumen. Esche und Bergahorn eignen sich auf vielen Standorten von Sturm und Borkenkäferflächen. In: *LWF aktuell* (72), S. 58–60.
- WEGNER, K. (2014): Quantifizierung von geomorphologischen Veränderungen an zwei Wildbachmündungen im Isarlauf bei Lengries - Vergleich von Daten des Terrestrischen Lidar und der Photogrammetrie. MSc-Arbeit. KU-Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt.
- WEHMANN, W.; VAN ZYL, C.; KRAMER, H.; WIDGER, D.; ZIMMERMANN, R. (2007): Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma RIEGL in diesem Testfeld. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* 132 (3), S. 175–180.
- WHEATON, J. M. (2008): Uncertainty in morphological sediment budgeting of rivers. Centre for Ecology & Hydrology.
- WHEATON, J. M.; BRASINGTON, J.; DARBY, S. E.; MERZ, J.; PASTERNAK, G. B.; SEAR, D.; VERICAT, D. (2010b): Linking geomorphic changes to salmonid habitat at a scale relevant to fish. In: *River research and applications* 26 (4), S. 469–486.
- WHEATON, J. M.; BRASINGTON, J.; DARBY, S. E.; SEAR, D. A. (2010a): Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. In: *Earth surface processes and landforms* 35 (2), S. 136–156.
- WHG (2002): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG). WHG, vom 2005.

- WILLIAMS, D. D. (2006): The biology of temporary waters. Oxford, New York: Oxford University Press (Oxford biology).
- WILLIAMS, G. P. (1978): Bank-full discharge of rivers. In: *Water resources research* 14 (6), S. 1141–1154.
- WILLIAMS, J. E.; WOOD, C. A.; DOMBECK, M. P. (1997): Understanding watershed-scale restoration. In: WILLIAMS, J. E., WOOD, C. A. UND DOMBECK, M. P. (Hg.): *Watershed restoration: principles and practices*. Bethesda, Maryland: Amer Fisheries Society, S. 1–13.
- WILLIAMS, R. D.; BRASINGTON, J.; VERICAT, D.; HICKS, D. M. (2014): Hyperscale terrain modelling of braided rivers: fusing mobile terrestrial laser scanning and optical bathymetric mapping. In: *Earth surface processes and landforms* 39 (2), S. 167–183.
- WINTER, T. C.; HARVEY, J.; LEHN FRANKE, O.; ALLEY, W. M. (1998): Ground water and surface water. Denver, Colo: U.S. Geological Survey (U.S. Geological Survey circular, 1139).
- WOHL, E. (2008): Review of effects of large floods in resistant-boundary channels. In: HABERSACK, H., PIEGAY, H. UND RINALDI, M. (Hg.): *Gravel Bed Rivers 6: From Process Understanding to River Restoration*: Elsevier (11), S. 181–212.
- WOHL, E. (2014): Time and the rivers flowing: Fluvial geomorphology since 1960. In: *Geomorphology* 216, S. 263–282.
- WOLMAN, M. G. (1955): The natural channel of Brandywine creek, Pennsylvania. In: *United States Geological Survey Professional Paper 271*, S. 56.
- WOLMAN, M. G.; BRUSH JR, L. M. (1961): Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse noncohesive sands.
- WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. (1960): Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. In: *The Journal of geology*, S. 54–74.
- WOODGET, A. S.; CARBONNEAU, P. E.; VISSER, F.; MADDOCK, I. P. (2015): Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. In: *Earth surface processes and landforms* 40 (1), S. 47–64.
- WOOLSEY, S.; WEBER, C.; GONSER, T.; HOEHN, E.; HOSTMA, M.; JUNKER, B. ET AL. (2005): Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fließgewässerrevitalisierung: eine Publikation des Rhone-Thur Projektes: Rhone-Thur Forschungsprojekt der Eawag, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- WRRL- WASSERRAHMENRICHTLINIE (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik: Oktober.
- WULF, A. J. (2001): Die Eignung landschaftsökologischer Bewertungskriterien für die raumbezogene Umweltplanung: Libri Books on Demand.
- WWA INGOLSTADT (2011): Dynamisierung der Donauaauen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Betriebsvorschrift für die Steuerung der Bauwerke. Ingolstadt
- YALIN, M. S. (1992): River mechanics.
- YALIN, S. M.; DA SILVA, F. A. (2001): Fluvial processes: IAHR Delft, The Netherlands.

- YANG, C. (1971): Formation of Riffles and Pools (7), S. 1567–1574.
- YEN, C.-L.; LEE, K. T. (1995): Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 121 (8), S. 591–599.
- YOSHIMURA, T.; HASEGAWA, H. (2003): Comparing the precision and accuracy of GPS positioning in forested areas. In: *Journal of Forest Research* 8 (3), S. 147–152.
- YU, D.; LANE, S. N. (2006): Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects. In: *Hydrological processes* 20 (7), S. 1541–1565.
- ZAMBRANO-BIGIARINI, M. (2012): hydroTSM: Time series management, analysis and interpolation for hydrological modelling. In: *R package version 0.3-3*.
- ZANKE, U. (1976): Über den Einfluß von Kornmaterial, Strömungen und Wasserständen auf die Kenngrößen von Transportkörpern in offenen Gerinnen: Franzius-Inst.
- ZARN, B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich.
- ZEILEIS, A.; GROTHENDIECK, G. (2005): zoo: S3 infrastructure for regular and irregular time series. In: *arXiv preprint math/0505527*.
- ZELLER, J. (1967): Flussmorphologische Studie zum Mäanderproblem: Versuchsanst. f. Wasserbau u. Erdbau an d. Eidgenöss. Techn. Hochsch. in Zürich.
- ZERBE, S.; WIEGLEB, G. (Hg.) (2009): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa: Spektrum Akademischer Verlag.
- ZHANG, K.; CHEN, S.-C.; WHITMAN, D.; SHYU, M.-L.; YAN, J.; ZHANG, C. (2003): A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. In: *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 41 (4), S. 872–882.
- ZIMMERMAN, R. C.; COMER, G. H.; GOODLETT, J. C. (1967): The influence of vegetation on channel form of small streams.
- ZIPPELT, K.; CZERNY, R. (Hg.) (2010): Collection and Interpretation of Point Clouds of Terrestrial Laserscanning as a Basis for Hydraulic Flow Modelling. FIG Congress 2010 - Facing the Challenges - Building the Capacity, 11.-16.April 2010, Sydney/Australien.
- ZOGG, J.-M. (2011): GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten. Users Guide. In: *Ublox Users Guide, Ublox AG, Thalwil*, S. 61.

11. ANHANG

1-1: Tabelle: Zusammenstellung von Umgebungsgewässern aus einer Literaturrecherche ergänzt nach KAUFMANN 2012 um regionale Daten.

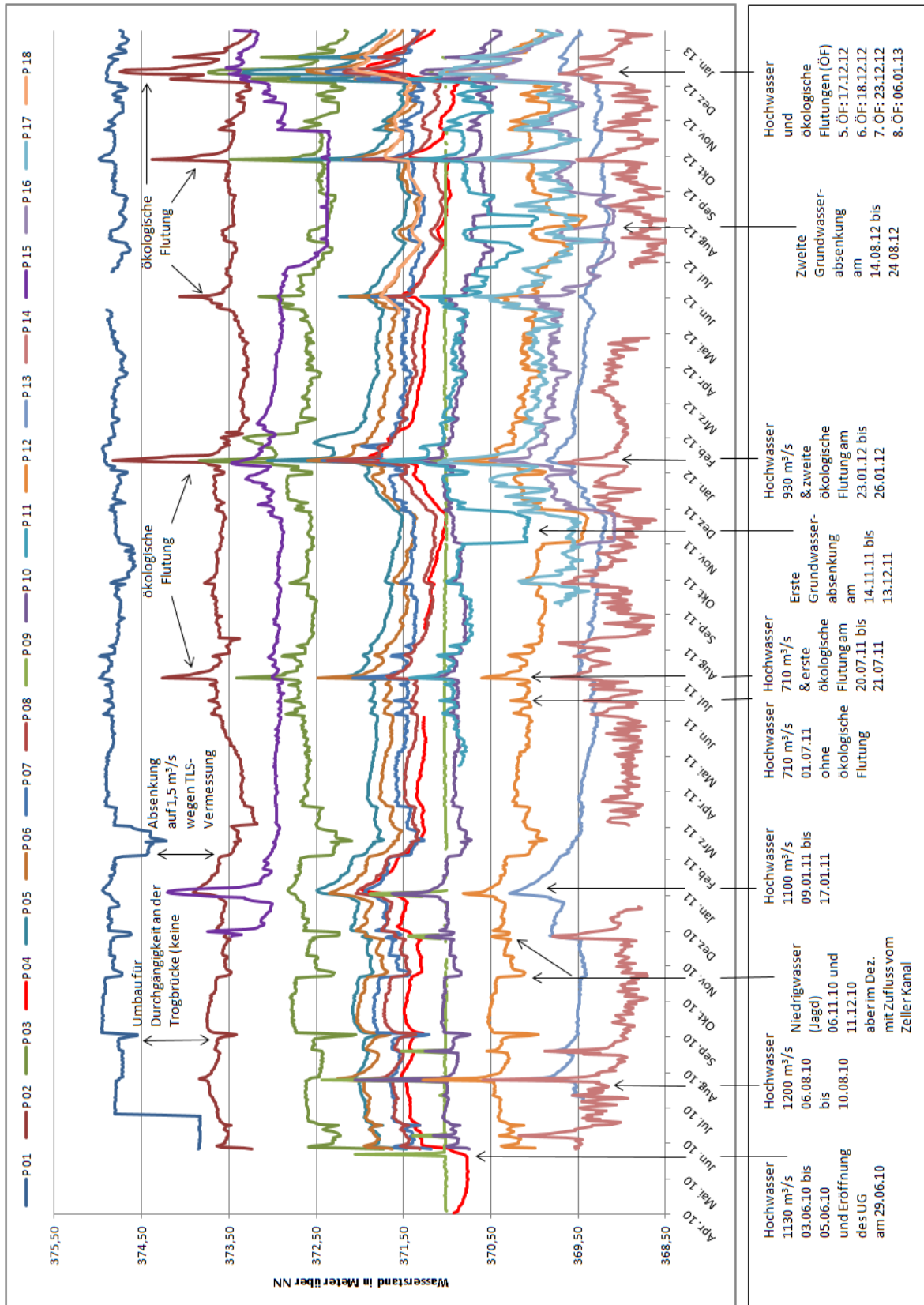
Hauptfluss	Ort	Abfluss UG (m ³ /s)	Länge (m)	Steigung (%)	Im UG nachgewiesene Fischarten	Effizienz UG (%)	Quelle
Aare	Rupperswil, Schweiz	2 bis 4	660	1,3			(Guthruf 2006)
Aare	Ruppoldingen, Schweiz	2,5 bis 5	1200		Alle lokal vorkommenden		(Aquarius 2007)
Aare	Schönenwerd, Schweiz				Alle lokal vorkommenden	100	(Kirchhofer and Breitenstein 2008)
Aare	Winznau, Gösgen, Schweiz	0,7	<200		Alle lokal vorkommenden	73	(Guthruf 2006)
Aspe	Soeix, Frankreich	0,15 bis 1,9			Alle lokal vorkommenden	59	(Jungwirth, Schmutz et al. 1998)
Aspe	Bedous, Frankreich	0,7			Alle lokal vorkommenden	17	(Jungwirth, Schmutz et al. 1998)
Birs	Laufen, Schweiz	0,15	90	3,2		gut	(Egloff 2012)
Donau	Bergheim, Deutschland	0,5 bis 5 (+25)	8400	0,06	34	100	(WIVT 2012, Pander et al. in press, Fischer et al in press)
Donau	Vohburg, Deutschland	3 bis max 9)	4000 8000	0,05	28	schlecht	(Hartmann & Seifert 1995, Kestel 2008,)
Donau	Freudenau, Österreich	1,8 bis 3,6	800	1	Alle lokal vorkommenden		(Steiner 1998)
East River, Town Brook River	Newfield Street Dam, USA		30			40-94	(Steiner 1998)
Eder	Hatzfeld, Deutschland	0,2-0,4	80	1,8			(Jungwirth, Schmutz et al. 1998)
Elbe	Geesthacht, Deutschland	6,3	216	3,3	Alle lokal vorkommenden		(Faller and Schwevers 2012)
Eman	oberhalb Finsjö, Schweden	1,5	370	2,5		74	(Calles and Greenberg 2005; Calles and Greenberg 2007)
Eman	unterhalb Finsjö, Schweden		150	1,8		74	(Calles and Greenberg 2005; Calles and Greenberg 2007)
Lima	Ponte de Lima, Portugal		26		8		(Santos, Ferreira et al. 2005)
Marchfeld-Kanal	Wien, Österreich	0,25	400	0,5	Alle lokal vorkommenden (35)		(DVWK 1996)
Mur	KW Unzmark, Österreich		200	4,2	Alle lokal vorkommenden	schlechter abstieg	(Eberstaller, Hinterhofer et al. 1998)
Mur	KW Fischen, Österreich	0,165	350	3,4	Alle lokal vorkommenden	17	(Eberstaller, Hinterhofer et al. 1998)
Mustijoki	Brasas, Finland			5			(Jormola 2012)
Nive	Halsou, Frankreich	0,45			Alle lokal vorkommenden	58	(Ingendahl, Bach et al. 1995; Larinier and Travade 1996)
Ossau	St Cricq, Frankreich	0,5-0,8			Alle lokal vorkommenden	85	(Jungwirth, Schmutz et al. 1998)
Renchflutkanal	Memprechtshofen, Deutschland	0,35	100	2,5			(Arnold 2006)

Rhein	Rheinfelden, Schweiz	10 bis 35	1000	0,9		(Schmutz, Melcher et al. 2008)
Rhein	Albruck, Dogern, Leibstadt	2 bis 5	800		32	sehr gut (RADAG 2012)
Tirsbaek	Tirsbaek brook, Dänemark		130	1,6		90 (Dodson, Gibson et al. 1998)
Wupper	Buchenhofen, Deutschland	0,3-0,4	180	4,1		(Gebler 1998)

6.1-1: Tab mit Ökologischen Flutungen und Hochwasserereignissen seit 2010 (nach HND).

Jahr	Stunden über 600 m³/s	Spitzenwert Neuburg ca. in m³/s	Spitzenwert Ingolstadt, Luitpoldstr. ca. in m³/s	Ökologische Flutung (Nr.)	Datum
2010					
1.	59 Std.	1130	1200		04.06.2010
2.	78 Std.	840	900		20.06.2010
3.	37 Std.	800	805		25.07.2010
4.	11 Std.	650	665		28.07.2010
5.	14 Std.	620	645		30.07.2010
6.	90 Std.	1200	1240		07.08.2010
7.	16 Std.	680	650		29.08.2010
8.	73 Std.	950	950		01.09.2010
9.		990	990		09.12.2010
2011					
1.	212 Std.	1100	1150		15.01.2011
2.	10 Std.	710	770		01.07.2011
3.	33 Std.	710	750	1. ÖF	21.07.2011
4.	0 Std.	595	565		08.08.2011
5.	4 Std.	605	585		11.10.2011
2012					
1.	23 Std.	620	640		06.01.2012
2.	120 Std.	910	900	2. ÖF	23.01.2012
3.	1 Std.	605	580		05.06.2012
4.	2 Std.	610	635		11.06.2012
5.	18 Std.	700	680	3. ÖF	13.06.2012
6.	38 Std.	770	800	4. ÖF	10.10.2012
7.	0 Std.	600	600	5. ÖF	17.12.2012
8.	14 Std.	620	615	6. ÖF	18.12.2012
9.	153 Std.	825	840	7. ÖF	24.-27.12.2012
2013					
1.	36 Std.	770	740	8. ÖF	06.01.2013
2.	15 Std.	700	660		31.01.2013
3.	139 Std.	910	925	9. ÖF	02-07.02.2013
4.	6 Std.	630	675		21.04.2013
5.	189 Std.	1550	1570	1. NF	04.06.2013
6.	166 Std.	1190	1200	10. ÖF	13.06.2013
7.	10 Std.	630	650		14.09.2013
8.	60 Std.	860	879		20.09.2013
9.	9 Std.	610	620		16.10.2013
2014					
1.	5 Std.	610	600		12.07.2014
2.	6 Std.	610	610		27.07.2014
3.	12 Std.	790	770		01.08.2014
4.	20 Std.	750	760		24.10.2014

6.1-2: Ganglinien der permanenten (stationären) Pegel und Ereignisse



6.1-3: Tabelle: Dimensionsbeschreibende Querprofilgrößen (Breite, Tiefe) für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

Breite (BV)	mittlerer Fließgeschwindigkeit in m/s		bordvoller Abfluss in qkm	
	Aufnahme 1	Aufnahme 5	Aufnahme 1	Aufnahme 5
QP 1	0,94	0,91	21,26	20,03
QP 2	0,91	0,95	25,07	27,70
QP 3	0,96	0,93	27,14	29,19
QP 4	0,76	0,72	10,34	9,37
QP 5	1,03	1,05	25,19	25,56
QP 6	1,10	1,14	31,76	34,44
QP 7	1,15	1,30	21,76	43,24
QP 8	1,08	0,92	28,43	18,98
QP 9	0,86	0,85	11,63	10,72
QP 10	0,88	0,88	11,63	11,77
QP 11	0,86	0,87	10,97	11,41
QP 12	0,84	0,91	14,90	17,82
QP 13	0,89	0,95	20,02	21,54
QP 14	0,96	0,97	20,27	20,92
QP 15	1,14	1,16	46,18	48,53
QP 16	0,96	0,97	14,66	16,63
QP 17	1,02	1,09	20,56	25,22
QP 18	1,04	0,97	25,54	21,72
QP 19	0,97	1,00	19,47	21,89
QP 20	0,81	0,87	8,54	10,46
QP 21	0,98	0,93	23,62	20,98
QP 22	0,86	0,85	12,70	12,10
QP 23	0,72	0,75	7,16	8,25
QP 24	0,76	0,78	6,56	6,76
QP 25	0,54	0,82	3,33	11,76
QP 26	1,27	1,18	39,42	35,70
QP 27	1,17	1,16	30,47	29,47
QP 28	0,93	1,15	31,52	55,77
QP 29	0,70	1,10	6,84	29,79
QP 30	0,83	0,92	10,42	14,23
QP 31	0,50	0,58	3,26	5,10
QP 32	0,90	0,47	4,08	2,44
QP 33	1,09	1,39	44,37	67,35

6.2-1: Tabelle: Pools und Riffles 2010 in m, bezogen auf die ersten 2 km Fließgewässerstrecke („Trogbrücke bis südlich Albenschüttweiher“). Tiefe entspricht der residualen Pooltiefe (Erklärung Kapitel 5, Abb. 5-9).

Struktur	Breite	Länge	Tiefe	Struktur	Breite	Länge	Höhe
Pool	1,0	2,0	0,7	Riffle	2,0	2,0	0,2
Pool	1,5	3,0	0,6	Riffle	2,0	20,0	0,2
Pool	1,5	3,0	0,6	Riffle	2,0	10,0	0,1
Pool	1,5	2,0	0,8	Riffle	4,0	10,0	0,0
Pool	1,5	1,5	0,6	Riffle	4,0	5,0	0,0
Pool	1,0	1,0	0,6	Riffle	4,0	10,0	0,0
Pool	1,0	2,0	0,4	Riffle	2,0	4,0	0,0
Pool	0,5	0,5	0,4	Riffle	2,0	8,0	0,0
Pool	1,5	4,0	0,5	Riffle	2,2	12,0	0,1
Pool	1,0	2,0	0,4	Riffle	3,0	28,0	0,0
Pool	1,5	5,0	0,7	Riffle	5,0	30,0	0,0
Pool	2,0	2,0	0,6	Riffle	4,0	10,0	0,0
Pool	1,5	4,0	0,7				
Pool	1,5	8,0	0,6				
Pool	1,5	4,0	0,4				
Pool	2,5	5,0	0,9				
Pool	1,0	8,0	0,6				
Pool	1,5	5,0	0,7				
Pool	2,0	6,0	0,9				
Pool	1,5	3,0	0,7				
Pool	1,5	3,0	0,7				
Pool	1,5	4,0	0,6				
Pool	1,5	2,0	0,5				
Pool	1,5	5,0	0,5				
Pool	1,0	8,0	0,5				
Min	0,5	0,5	0,4	Min	2,0	2,0	0,0
Max	2,5	8,0	0,9	Max	36,2	149,0	0,6
Mittel	1,4	3,7	0,6	Mittel	3,0	12,4	0,0
Längere durchgängig tiefe Abschnitte							
Pool	1,2	10,0	0,8	Bereich „süd. Albenschüttweiher“			
Pool	5,0	10,0	1,5	„Wetterloch“			
Pool	1,0	10,0	0,5	Nach der „Wegekreuzung“			
Pool	1,5	12,0	0,5	Bereich um Prallhang „Radwegbrücke“			

6.2-2: Tabelle: Dimensionsbeschreibende Querprofilgrößen (Breite, Tiefe) für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

Breite (BV)	mittlere Tiefe (BV)			maximale Tiefe (BV)	
	Breite	Aufnahme 1	Aufnahme 5	Aufnahme 1	Aufnahme 5
QP 1	19,00	1,25	1,31	2,17	2,01
QP 2	24,50	1,20	1,34	2,08	2,25
QP 3	25,50	1,09	1,39	2,38	2,32
QP 4	15,00	0,88	1,08	2,06	2,19
QP 5	16,50	1,44	1,58	2,52	2,47
QP 6	17,50	1,60	1,53	3,02	2,61
QP 7	14,50	1,25	2,11	2,45	2,82
QP 8	17,50	1,43	1,14	2,12	1,60
QP 9	12,00	1,09	0,96	2,16	1,61
QP 10	12,00	1,06	1,07	1,86	1,80
QP 11	12,00	1,02	1,06	1,94	1,98
QP 12	16,25	1,04	1,19	1,89	1,94
QP 13	19,00	1,15	1,18	2,54	2,38
QP 14	17,00	1,21	1,27	2,28	2,26
QP 15	25,50	1,56	1,61	2,35	2,52
QP 16	13,00	1,13	1,26	2,01	2,11
QP 17	14,00	1,39	1,41	2,50	2,50
QP 18	16,50	1,45	1,30	2,67	1,87
QP 19	15,50	1,26	1,35	2,48	2,12
QP 20	10,75	0,92	1,07	1,80	1,75
QP 21	18,25	1,24	1,21	2,51	1,98
QP 22	12,25	1,09	1,10	1,79	1,79
QP 23	12,75	0,73	0,81	1,35	1,40
QP 24	9,50	0,82	0,80	1,57	1,48
QP 25	15,25	0,36	1,13	1,80	2,16
QP 26	15,50	1,88	2,01	3,94	3,53
QP 27	13,75	1,78	1,74	2,72	2,60
QP 28	29,00	1,13	1,93	2,44	3,18
QP 29	16,00	0,74	1,72	1,76	3,36
QP 30	12,75	0,94	1,16	1,51	1,84
QP 31	15,25	0,42	0,54	0,88	1,05
QP 32	14,00	0,31	0,35	0,83	0,70
QP 33	25,50	1,94	1,86	3,10	3,10

6.2-3: Tabelle: Dimensionsbeschreibende Querprofilgrößen (Breite, Tiefe) für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

Breite (BV)	Fläche		benetzter Umfang		hydraulischer Radius	
	Aufnahme 1	Aufnahme 5	Aufnahme 1	Aufnahme 5	Aufnahme 1	Aufnahme 5
QP 1	22,70	21,91	19,88	19,90	1,14	1,10
QP 2	27,59	29,30	25,29	25,31	1,09	1,16
QP 3	28,14	31,28	23,58	27,54	1,19	1,14
QP 4	13,59	12,93	16,26	16,64	0,84	0,78
QP 5	24,57	24,29	18,79	17,86	1,31	1,36
QP 6	28,86	30,12	19,84	19,55	1,45	1,54
QP 7	18,85	33,31	12,06	17,88	1,56	1,86
QP 8	26,39	20,66	18,73	18,63	1,41	1,11
QP 9	13,57	12,66	13,57	12,90	1,00	0,98
QP 10	13,27	13,37	12,83	12,84	1,03	1,04
QP 11	12,80	13,15	12,80	12,91	1,00	1,02
QP 12	17,69	19,58	18,18	17,89	0,97	1,09
QP 13	22,51	22,72	21,29	19,54	1,06	1,16
QP 14	21,12	21,65	17,82	18,09	1,19	1,20
QP 15	40,62	41,94	26,59	26,74	1,53	1,57
QP 16	15,26	17,08	12,88	14,10	1,19	1,21
QP 17	20,22	23,09	15,66	16,06	1,29	1,44
QP 18	24,63	22,35	18,52	18,50	1,33	1,21
QP 19	20,16	21,78	16,87	17,16	1,20	1,27
QP 20	10,55	12,05	11,50	11,82	0,92	1,02
QP 21	24,16	22,46	19,84	19,75	1,22	1,14
QP 22	14,70	14,22	14,54	14,39	1,01	0,99
QP 23	10,02	10,93	13,15	13,23	0,76	0,83
QP 24	8,58	8,72	10,20	10,15	0,84	0,86
QP 25	6,14	14,27	12,23	15,14	0,50	0,94
QP 26	31,05	30,16	17,23	18,59	1,80	1,62
QP 27	26,06	25,37	16,37	16,09	1,59	1,58
QP 28	33,78	48,59	29,75	31,37	1,14	1,55
QP 29	9,79	27,13	13,31	18,71	0,74	1,45
QP 30	12,61	15,41	13,32	13,78	0,95	1,12
QP 31	6,50	8,75	14,47	15,63	0,45	0,56
QP 32	4,54	5,21	4,22	12,94	1,08	0,40
QP 33	40,58	48,48	28,18	23,50	1,44	2,06

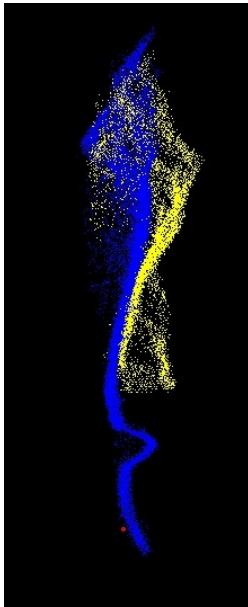
6.2-4: Tabelle: Dimensionsbeschreibende Querprofilgrößen (Breite, Tiefe) für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

Breite (BV)	Breite (BV)/ Mittlerer Tiefe (BV)		Breite(BV)/ Maximal Tiefe (BV)	
	Aufnahme 1	Aufnahme 5	Aufnahme 1	Aufnahme 5
QP 1	15,20	14,50	8,78	9,45
QP 2	20,50	18,28	11,78	10,89
QP 3	23,41	18,28	10,71	10,99
QP 4	17,11	13,86	7,28	6,85
QP 5	11,49	10,47	6,56	6,68
QP 6	10,91	11,45	5,80	6,72
QP 7	11,65	6,88	5,92	5,14
QP 8	12,25	15,37	8,25	10,94
QP 9	11,06	12,51	5,56	7,48
QP 10	11,31	11,22	6,45	6,67
QP 11	11,72	11,34	6,20	6,08
QP 12	15,59	13,69	8,60	8,38
QP 13	16,46	16,14	7,50	7,98
QP 14	14,09	13,39	7,47	7,54
QP 15	16,32	15,81	10,85	10,12
QP 16	11,50	10,32	6,47	6,18
QP 17	10,07	9,90	5,61	5,61
QP 18	11,39	12,65	6,19	8,82
QP 19	12,30	11,52	6,25	7,31
QP 20	11,70	10,00	5,97	6,14
QP 21	14,74	15,13	7,27	9,22
QP 22	11,24	11,14	6,86	6,86
QP 23	17,42	15,82	9,44	9,11
QP 24	11,52	11,89	6,05	6,42
QP 25	42,82	13,50	8,50	7,06
QP 26	8,26	7,70	3,93	4,40
QP 27	7,74	7,89	5,06	5,30
QP 28	25,60	15,04	11,91	9,12
QP 29	21,69	9,28	9,12	4,76
QP 30	13,64	10,96	8,47	6,93
QP 31	36,51	28,28	17,33	14,59
QP 32	45,79	40,03	16,87	20,00
QP 33	13,14	13,73	8,24	8,24

6.2-5: Tabelle: Dimensionsbeschreibende Querprofilgrößen (Breite, Tiefe) für das bordvolle Niveau (Aufnahme 1 und Aufnahme 5) an der OHB-Neubaustrecke (Mittelwerte, n = 33).

Breite (BV)	Breite (MW)	maximale Tiefe (MW)	Breite (MW)/Tiefe (MW)
	Aufnahme 5	Aufnahme 5	Aufnahme 5
QP 1	9,35	0,54	17,31
QP 2	10,38	0,70	14,82
QP 3	4,75	0,86	5,52
QP 4	14,02	1,30	10,78
QP 5	8,63	1,02	8,46
QP 6	11,42	0,83	13,84
QP 7	11,92	0,84	14,14
QP 8	14,37	0,61	23,55
QP 9	8,47	0,80	10,61
QP 10	7,46	0,89	8,36
QP 11	8,20	1,20	6,84
QP 12	10,39	0,82	12,65
QP 13	5,78	1,28	4,53
QP 14	10,24	1,04	9,87
QP 15	18,82	1,03	18,29
QP 16	8,03	0,89	9,06
QP 17	11,02	1,06	10,38
QP 18	11,86	0,29	40,75
QP 19	10,61	0,71	15,01
QP 20	6,73	0,80	8,46
QP 21	8,14	0,88	9,23
QP 22	9,61	0,95	10,07
QP 23	8,47	0,70	12,10
QP 24	7,54	1,08	6,98
QP 25	5,40	0,68	7,97
QP 26	8,67	1,47	5,90
QP 27	9,65	0,70	13,75
QP 28	11,32	1,18	9,59
QP 29	8,50	1,86	4,57
QP 30	10,78	1,19	9,06
QP 31	13,06	0,91	14,35
QP 32	11,95	0,62	19,27
QP 33	11,93	0,67	17,93

6.2-6: Bereich um die Mittelwasserlinie und die damit verbundene Ausbildung der Erosionsrille (Hohlkehle) in den stabilen Tonschichten des Prallhangs, die nur unter gedrosselter Dotationsmenge aufgenommen werden kann (Punktwolke).



Mit TLS aufzunehmender Prallhangbereich
unter „normalen“ Abflussbedingungen.
Aufnahme 1 (blau), Aufnahme 2 (gelb)



Mittelwasserlinie und
Höhenbereich der Hohlkehle