

# MASTERARBEIT

Effiziente Wassernutzung im urbanen Raum

Zur Erlangung des akademischen Grades

M.Eng.

im Studiengang Klimagerechtes Bauen und Betreiben

an der BTU Cottbus-Senftenberg

verlegt von

**Wioletta Simlat**

---

Betreuer:

Dr.-Ing. Andrea Straub

Prof. Günter Mügge

Eingereicht am:

26.06.2017

**Aufgabenstellung für die Masterthesis  
von Frau Wioletta Simlat (Matrikelnr. 312915)**

**Effiziente Wassernutzung im urbanen Raum**

Efficient rainwater management in urban regions

Die Begrifflichkeiten „Energiewende“ und „Klimawandel“ führen immer häufiger zu einer entsprechenden Umsetzung von Vorgaben zur Verminderung der Wasserverbrauchs sowie der Anpassung an ein sich änderndes Klima. Auch im Bereich der Planung, des Baus und des Betriebs von Gebäuden sind Standards zur Wasserreduzierung nicht mehr wegzudenken.

Die Nutzung von Wasserressourcen, wie Regenwasser oder Grauwasser, ist ein Mittel zur Reduzierung der Nutzung natürlicher Wässer und von Energie. Zusätzlich können je nach Anwendungsfall das räumliche Klima im Gebäude wie auch im urbanen Raum beeinflusst werden.

Im Rahmen der Arbeit sind verschiedene Möglichkeiten zur Nutzung von Wasser im Hinblick auf Wasser- wie auch Energieeinsparung global wie auch lokal aufzuzeigen. Dabei ist ein besonderer Wert auf die Darstellung weltweit neuerer Entwicklungen hinsichtlich der Nutzung/Rückgewinnung von Wasser zu legen.


Zu bewerten sind die Auslegungsgrundlagen der jeweiligen Nutzungsart einschließlich deren Vor-, Nachteile, Defizite, Einsatzbereiche. Dabei sind unter anderem zu klären,

- inwieweit sich die Effizienz und Nachhaltigkeit eines Gebäudes durch die ermittelten Wassereinsparungssysteme beeinflussen lassen.
- wie Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung in das städtebauliche Konzept unter Abkopplung von den Fließgewässern zu integrieren sind.
- inwieweit sich diese Entwicklungen technisch wie auch rechtlich umsetzen lassen.
- welche weiteren Verbesserungspotenziale in der derzeitigen Entwicklung gesehen werden (z. B. Regenwasserumgang bei Starkniederschlägen in bebauten Gebieten).

Anhand eines ausgewählten Beispiels sind die vorgestellten Möglichkeiten näher auszuführen und eine Vorplanung durchzuführen. Abschließend ist die Planung ökonomisch und ökologisch zu bewerten.

Cottbus, den 08.05.2017

Abgabe der Arbeit: 08.08.2017



Dr.-Ing. A. Straub

# ABSTRACT

---

Heutzutage ist Nachhaltigkeit in allen Lebensaspekten besonders wichtig. Durch den Klimawandel und den übermäßigen Konsum aufgrund des Bevölkerungswachstums, werden die globale Trinkwasservorräte in großen Maßen ausgenutzt [1, S. 118]. Um diesen negativen Tendenzen zu unterbrechen, sind entsprechende Maßnahmen zur effizienten Nutzung der Wasserressourcen in den urbanen Räumen weltweit zwingend erforderlich.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit einem Entwurf für einen effizienten und nachhaltigen Teil des städtischen Bereiches, mit besonderer Betrachtung von Systemen zur Wasserwiederverwendung, Regenwasserbewirtschaftung und Low Impact Development sowie deren Abhängigkeit von regionalen Aspekten. Der Entwurf soll eine Grundlage zur Entwicklung und Planung für urbane Räume in Verbindung mit Wassereffizienz und Nachhaltigkeit in bestimmten Regionen bilden.

Auf Grundlage der Bewertung anhand der Kriterien der Gebäudezertifizierung wurde nachgewiesen, dass die Integration der oben beschriebenen Methoden sowohl auf regionaler als auch auf globaler Ebene mehrere Vorteile für Gebäude und deren Umgebung bringen. Es wurde eine Tendenz beim nachhaltigen Bauen, das auf natürliche Systeme und Methoden zurückgreift, erkannt. Heutzutage sollen Gebäude in einer Harmonie mit der Umgebung und der Umwelt gebaut werden, was zur Reduktion der menschlichen Einflüsse auf den Klimawandel führt. Durch die Förderung dieser Art der Entwicklung in urbanen Räumen, können zukünftige Städte zur Bewältigung der Wasserknappheit, Verbesserung der Wasserqualität und Regeneration der Wasserressourcen einen Beitrag leisten. Eine gelungene Planung erfordert jedoch Beobachtungen der vielfältigen Wechselwirkungen sowie der verschiedenen sozialen, ökologischen, ökonomischen, rechtlichen und politischen Aspekte.

# DANKSAGUNG

---

*Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.*

*Ganz besonders gilt dieser Dank Frau Dr.-Ing. Andrea Straub, die mir geholfen hat, dieses Thema zusammen zu fassen und auf besonders interessante Thema zu fokussieren. Ihre Hinweise, Anmerkungen, Motivation und Unterstützung waren unschlagbar. Sie hat mich dazu gebracht, über meine Grenzen hinaus zu denken und über mich hinaus zu wachsen. Vielen Dank für das Verständnis, die Geduld und die Bemühungen.*

*Ein weiterer Dank gilt auch der Firma SPIE GmbH in Berlin für die Unterstützung und die zeitliche Flexibilität, die ich von meinen Vorgesetzten bekommen habe, um das Berufsleben mit der Ausbildung verknüpfen zu können. Hier geht besonderer Dank an Herrn Dr. Möbius und Herrn Jungnickel für die Verständnis, dass manche Sachen manchmal mehr Zeit im Anspruch nehmen, als vorher geplant war...*

*Vielen herzlichen Dank gehört auch Fredy. Ohne seine Hinweise und technische Hilfe hätte das Verfassen dieser Arbeit viel länger gedauert. Danke auch für die unfassbare Menge an Motivation und Geduld in Zeiten der Verzweiflung. Außerdem gilt mein Dank meinen Eltern, die mich immer wieder motiviert haben und vor allem emotional immer für mich da waren.*

*Auch muss ich mich bei Antonia bedanken, die viel Zeit in die Korrektur meiner Arbeit investiert hat. Zahlreiche ungünstige Satzstellungen und Rechtschreibfehler wurden dank ihrer Hilfe gefunden und verbessert.*

*Zuletzt vielen Dank an all meine Freunde und Arbeitskollegen für ihr Verständnis, ihre Geduld sowie für sämtliche Hilfe.*



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>I</b>
<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>7</b>
<b>SYMBOLVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>9</b>
<b>2 WASSER IM URBANEN RAUM</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1 Effiziente Städte - Wassermanagement</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2 Nachhaltige Konzepte der Wasserversorgung</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3 Möglichkeiten zur Regenwasserbewirtschaftung im urbanen Raum</b> .....	<b>17</b>
<b>3 WIEDERVERWENDUNG VON WASSER</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1 Grauwasser</b> .....	<b>27</b>
3.1.1 Beschaffung und Qualität.....	28
3.1.2 Anforderungen an den Speicher .....	29
3.1.3 Einsparpotentiale.....	31
3.1.4 Defizite.....	32
<b>3.2 Regenwasser</b> .....	<b>32</b>
3.2.1 Beschaffung und Qualität.....	33
3.2.2 Funktionsweise des Systems .....	35
3.2.3 Anforderungen an Speicher.....	36
3.2.4 Einsparpotentiale.....	38
3.2.5 Defizite.....	39
<b>3.3 Andere alternative Wasserquellen</b> .....	<b>39</b>
3.3.1 Grundwasser.....	39
3.3.2 Kommunalabwasser .....	40
<b>3.4 Einsatzbereiche der alternativen Wasserquellen</b> .....	<b>41</b>
<b>4 FALLBEISPIELE – GLOBALE PERSPEKTIVE</b> .....	<b>45</b>
<b>4.1 Grundlangen der Planung</b> .....	<b>45</b>
4.1.1 Klimatische, hydrologische und Verbrauchsdaten .....	45
4.1.2 Sozialen und kulturellen Aspekte.....	51
4.1.3 Vorschriften und Wasserpolitik.....	52
4.1.4 Zusammenfassung.....	53
<b>4.2 Beschreibung des Ausgangssystems</b> .....	<b>59</b>
<b>4.3 Planung der Grauwassernutzung</b> .....	<b>61</b>
<b>4.4 Planung der Regenwassernutzung und Versickerungsanlagen</b> .....	<b>65</b>
4.4.1 Regenwasserversickerungskonzept - Außenanlagen.....	66
4.4.2 Regenwasserwiederverwendung – Dächer.....	77
<b>4.5 Erarbeitung der Konzepte</b> .....	<b>79</b>
<b>4.6 Zusammenfassung der Konzepte</b> .....	<b>86</b>
<b>5 BEWERTUNG DER KONZEPTE</b> .....	<b>91</b>
<b>5.1 Effizienz und Nachhaltigkeit</b> .....	<b>91</b>
5.1.1 Regionale Bewertung .....	91
5.1.2 Global.....	98
<b>5.2 Ökonomische Bewertung</b> .....	<b>99</b>

5.3	Ökologische Aspekte.....	101
6	FAZIT .....	102
6.1	Schlussfolgerungen .....	102
6.2	Verbesserungspotenziale.....	104
	QUELLENVERZEICHNIS .....	106
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	115
	TABELLENVERZEICHNIS .....	116
	ANHANGSVERZEICHNIS.....	117
	ANHANG.....	118

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
CFU	koloniebildende Einheit (eng. colony forming unit)
COP21	Weltklimakonferenz 21st Conference of Parties
CP	Credit Point - Bewertungseinheit in den Zertifizierungssystemen
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsche Institut für Normung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
EPA	United States Environmental Protection Agency
EU	Europäische Union
GRIHA	Green Rating for Integrated Habitat Assessment
GW	Grauwasser
IAH	International Association of Hydrogeologists Commission
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LID	Low Impact Development
MAR	Managed Aquifer Recharge – Grundwasserneubildung
MNRE	Ministry of New and Renewable Energy, Government of India
NMHSs	National Meteorological and Hydrological Services
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
RW	Regenwasser
SuDS	Sustainable urban Drainage System – nachhaltige Regenwasserbewirtschaftungssysteme
TERI	The Energy and Resources Institute, New Delhi
UN	Vereinten Nationen (eng.: United Nations)
UNFCCC	Zusatzprotokoll zur Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen
US	United States of America
WFD	Water Framework Directive
WHO	World Health Organisation (Weltgesundheitsorganisation)
WRI	World Resources Institute
WSUD	Water-Sensitive Urban Design

# SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$A_A$	$m^2$	Dachfläche
$A_E$	$m^2$	gesamt Fläche (Außenanlagen)
$A_S$	$m^2$	Versickerungsfläche
$A_u$	$m^2$	undurchlässige Fläche
$b$	m	Breite
BGF	$m^2$	Bruttogeschossfläche
$D$	min	Regendauer
$e$	-	Ertragsbeiwert
$E_R$	$m^3$	jährlicher Regenertrag
$f_Z$	-	Zuschlagsfaktor
$h$	m	Höhe
$h_N$	mm	maximale jährliche Niederschlagshöhe
$i$	mm/min	Regenstärke
$I_R$	m	Rigolen Länge
$I_{hy}$	m/m	hydraulisches Gefälle
$k_f$	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert des Untergrundes
KF	$m^2$	Konstruktionsfläche
$n$	1/a	1/Wiederkehrzeiten T
$\eta$	-	hydraulische Filterwirkungsgrad
NF	$m^2$	Nutzfläche (NGF-VK)
NGF	$m^2$	Nettogeschossfläche (BGF-KF)
$\Psi_m$	-	mittlere Abflussbeiwert
$r$	m	Radius
$r_{D(n)}$	$l/s * ha$	Regenspende
$s_{RR}$	-	Gesamtspeicherkoeffizient der Rigole
$t_E$	h	Entleerungszeit einer Mulde
VK	$m^2$	Verkehrsfläche
$V_M$	$m^3$	Volumenspeicher
$Z_M$	m	Einstauhöhe einer Mulde

# 1 EINLEITUNG

*Das Veranlassung und Zielstellung der Arbeit wird im Folgenden beschrieben.*

Seit der industriellen Revolution tragen die Menschen einen großen Beitrag zur Beschleunigung des natürlichen Wechselprozesses der Erde bei. Eine der wichtigsten Beweise dafür ist die signifikante Steigerung der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, was der Hauptgrund der globalen Erwärmung ist [2, S. 48]. In Abbildung 1 wurde die Steigerung der mittleren Jahrestemperatur, gemessen von der National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs) im Jahr 2016 grafisch dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Mitteltemperatur in der nördlichen Hemisphäre bereits 1,1 °C höher, als die Durchschnittswerte aus dem Zeitraum 1961-1990 betragen. Die Daten sind ein demonstrativer Nachweis der langfristigen Erwärmung der Erdoberfläche und somit auch des Klimawandels [3], [4].

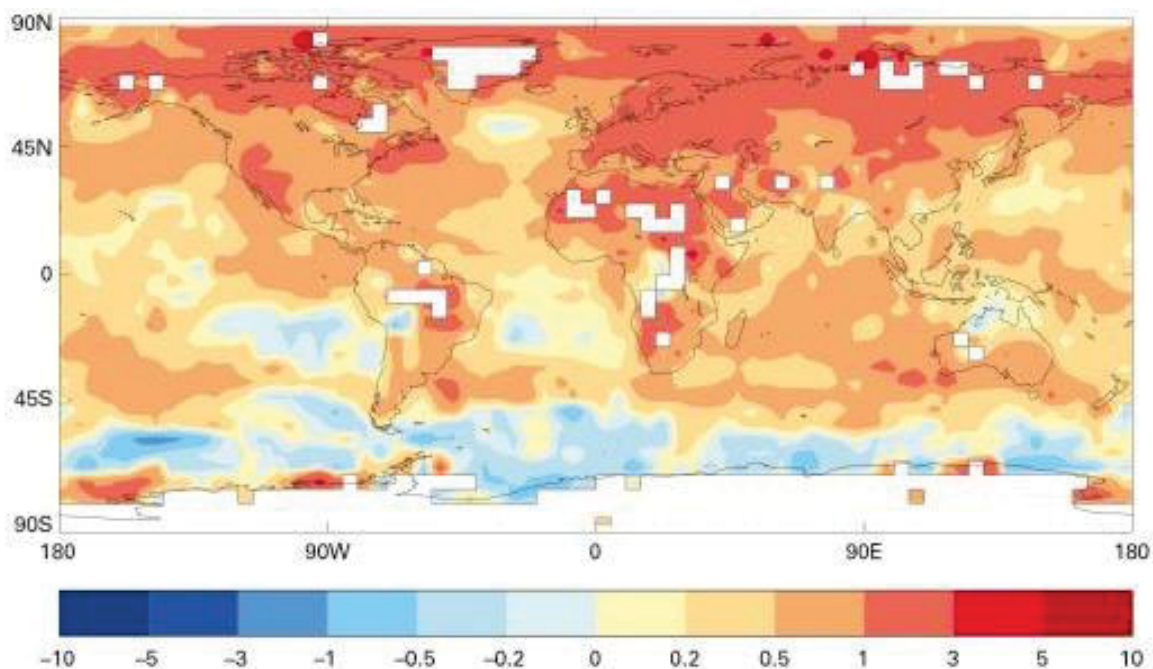


Abbildung 1: Steigerung der mittleren Jahrestemperatur ( im °C) im Vergleich zur Referenzzeitraum 1961-1990, [3]

In einer zunehmend globalisierten Welt führen langfristige Veränderungen wie wirtschaftliche Entwicklung, Bevölkerungswachstum und Urbanisierung sowie die Bedrohung durch die globale Erwärmung zuzunehmenden negativen Auswirkungen auf die natürlichen Ressourcen der Erde [5]. In seinem „Global Risks 2013“ berichtet das World Economic Forum

(WEF) über die globalen Wasserversorgungskrisen und bezeichnet diese als eine der höchsten Risiken für unsere Planeten. Nach den Schätzungen der World Resources Institute (WRI) bis 2030 wird die weltweite Nachfrage nach Energie und Wasser voraussichtlich um weitere 40 % bzw. 50 % in Bezug auf den aktuellen Stand wachsen [6].

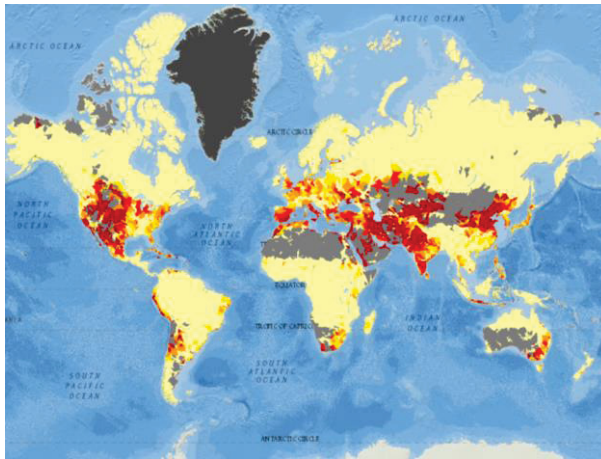


Abbildung 2: Wasserknappheit in der Welt, World Resources Institute, Stand für Jahr 2014, [9]

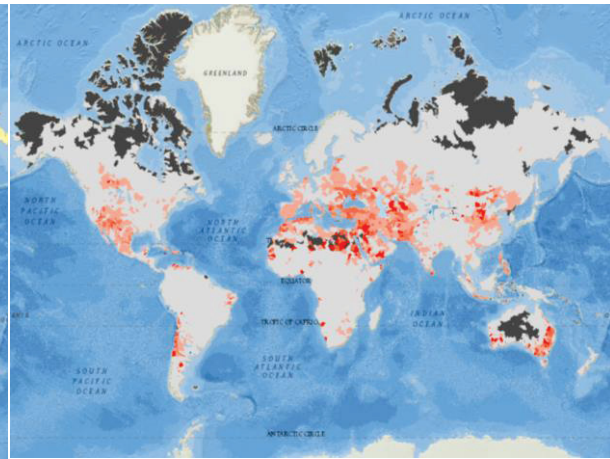
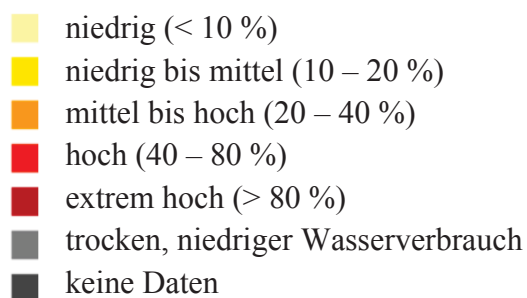
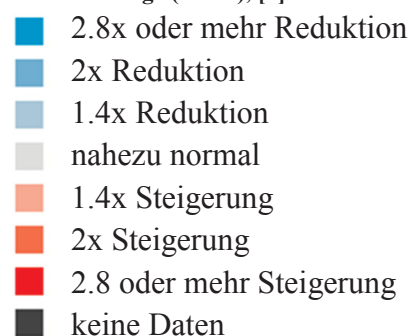


Abbildung 3: Wasserknappheit – Szenario für das Jahr 2030 auf der Grundlage von Erkenntnisse des 5. Sachstandsberichtes der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), [9]



In Abbildung 2 ist die globale Wasserknappheit im Jahr 2014 dargestellt. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage der so genannten „Basis-Wasser-Stress“ – das Verhältnis der gesamten jährlichen Wasserabhebungen aus Flüssen und Grundwasser, zu insgesamt verfügbaren, jährlichen, erneuerbaren Versorgung [7]. Abbildung 3 zeigt dagegen ein Zukunftsszenario für das Jahr 2030 bei der Annahme, dass die aktuellen Verbrauchsmuster eingehalten werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wasserknappheit auf der Welt ohne Einführung von Reduktionsmaßnahmen steigen wird, und das vor allem in den Trockengebieten wie Ost-Australien, Süden der USA und der Nahe Osten [9]. Zwei Faktoren: das Bevölkerungswachstum mit dessen Überkonsum und der Klimawandel werden als Hauptgrund der Wasserknappheit auf der Erde ausgezeichnet. Die rasche globale Urbanisierung hat zu einem zunehmenden Wachstum der städtischen Wassernutzung geführt, vor allem im Bereich des häuslichen Gebrauchs [8, S. 5]. Nach Angaben der UN Environmental Programme

werden in den Gebäuden etwa 40 % der globalen Energie, 25 % des globalen Wassers und 40 % der weltweiten Ressourcen genutzt [9]. Beim Einhalten des heutigen Durchschnittsverbrauchs werden voraussichtlich innerhalb des nächsten Vierteljahrhunderts die Hälfte bis zwei Drittel der Menschheit unter einem gravierenden Mangel an Süßwasser zu leiden haben [10, S. 8]. Um die negative Tendenz zu unterbrechen, sind entsprechende Maßnahmen zur effizienten Nutzung der Wasserressourcen weltweit zwingend erforderlich. Ein Potential bietet hier die städtische Wasserversorgung, die durch Implementierung der nachhaltigen Konzepte und Wasserwiederverwendung eine Reduktion des Wasserverbrauchs bis zu 80 % erreichen kann [9]. Zu beachten ist jedoch, dass das Bauwesen sehr stark vom Klima, Lage und den Wetterbedingungen abhängig ist. Der Wasserkreislauf wird durch globale und klimatische Kräfte angetrieben, die eine Variabilität bei Niederschlag und Verdunstung einführen, die wiederum Abflussmuster und Wasserverfügbarkeit über Raum und Zeit definieren. In den letzten Jahrzehnten weisen die Beobachtungen und Projektionen aus Klimawandelszenarien auf eine Verschärfung der räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Wasserkreislaufdynamik hin [11, S. 10]. Als Folge der globalen Erwärmung steigt die Verdunstung des Oberflächenwassers, was zu einer erhöhten Niederschlagsschwankung führen kann [8, S. 6]. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Gebäude und deren Außenbereich immer im Hinblick auf die tatsächlich vorherrschenden Umgebungsbedingungen zu planen somit sind die Effizienzmaßnahmen in jeder Klimazone gesondert zu betrachten.

In dieser Arbeit werden die nachhaltigen Wasserbewirtschaftungskonzepte für einen Entwurf eines Grundstücks im urbanen Raum mit Mischnutzung in verschiedenen klimatischen Regionen erarbeitet und verglichen. Es wird ein Fokus auf innovative Lösungen wie Fassaden- und Dachbegrünung sowie unkonventionelle Nutzung von alternativen bzw. recycelten Wasserquellen gesetzt. Im Sinne der Nachhaltigkeit werden entsprechend der hydrologischen und klimatischen Bedingungen, regenerative Regenwasserbewirtschaftungssysteme eingesetzt. Abschließend erfolgt eine Beurteilung, inwieweit diese Konzepte die regionalen Wasserreserven beeinflussen und welche Auswirkungen dies auf die globale Wasserwirtschaft hat.



## 2 WASSER IM URBANEN RAUM

---

*Die wichtigsten Grundlagen zum nachhaltigen Wassermanagement im urbanen Raum werden im Folgenden beschrieben, die Konzepte „Low Impact Development“ und „Nachhaltige Siedlungswasserbewirtschaftung“ ausführlich erklärt und die Potentiale für nachhaltige Versorgungskonzepte zusammengefasst.*

### 2.1 EFFIZIENTE STÄDTE - WASSERMANAGEMENT

Städte müssen heutzutage in der Lage sein, auf zukünftige Belastungen von zunehmenden Bevölkerungszahlen, Klimavariabilität und Klimawandel zu reagieren und gleichzeitig die angemessene Wasserversorgung für Bewohner und Unternehmen zu gewährleisten. Heutzutage wohnt ca. 54 % der Weltbevölkerung in städtischen Gebieten, statistisch gesehen wird diese Zahl im Jahr 2050 auf ca. 66 % steigen [12]. In Verbindung mit dem ständigen Bevölkerungswachstum, das nach Schätzung der UN in 2050 ca. 9,7 Billionen Menschen erreichen wird [13], ist auch mit stark zunehmendem Wasserverbrauch in den Städten, vor allem für den häuslichen Gebrauch zu rechnen. Bis 2030 wird die weltweite Nachfrage nach Energie und Wasser voraussichtlich um 40 % bzw. 50 % steigen, der Großteil dieses Wachstums wird in Städten sein [11, S. 49]. Um mögliche Spannungen zwischen Versorgung und Nachfrage zu verhindern, ist eine nachhaltige und effiziente Entwicklung der Städte zwingend erforderlich.

Heute verlangt das Wasserversorgungssystem adaptives und innovatives Management, das durch robuste Verbrauchsinformationen an Nutzer und Umwelt angepasst ist [1, S. 129]. Basierend auf wechselhaften Wasserversorgungen aufgrund von Dürren und veränderten Niederschlagsmustern, sowie steigenden Anforderungen, werden aktuell in vielen Städten Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserbedarfs umgesetzt, wie z. B. Installation von effizienten Armaturen in den Gebäuden, Wasserwiederverwendung (Regenwasser, Entsalzung des Meereswassers, Grauwasser etc.) und Wasserrecycling (Behandlung des Schwarzwassers). Leider sind die Installationskosten und die Amortisationszeit der innovativen Systeme oft ein wichtiger Entscheidungsfaktor. In diesem Zusammenhang ist es ausschlaggebend, die maximale Effizienz dieser Systeme zu erreichen und dadurch deren Rentabilität zu verbessern. Dies kann nur aufgrund einer vertieften Analyse der Verbrauchsinformationen

und Mustern erfolgen. Der Einsatz intelligenter Messgeräte ermöglicht nicht nur die Erstellung der verschiedenen Wohn-, Handels- und Industrieverbrauchsmuster in der Stadt und die Anpassung der Versorgung an den tatsächlichen Bedarf, sondern bildet eine Grundlage zur Determinanten der zukünftigen Nachfrage (wie z. B. Veränderungen im Wohnungsbestand - größere oder kleinere Gärten zur Bewässerung, zunehmende Anzahl von Wasserverbrauchsgeräten, oder Änderungen an Wasserverbrauchspraktiken - kürzeres oder längeres Duschen, etc.) [1, S. 135]. Aufgrund von gesammelten Verbrauchsinformationen, können entsprechende Wassereffizienzmaßnahmen in der Stadt eingesetzt werden.

## **2.2 NACHHALTIGE KONZEPTE DER WASSERVERSORGUNG**

Das Wasser ist Basis des Lebens und die wichtigste Sicherung für die sozioökonomische Entwicklung [8, S. 500]. Jedoch aufgrund des Überkonsums verbunden mit Bevölkerungswachstum und regional konzentrierter Abnahme, werden die natürlichen Ressourcen langsam aufgebraucht. In seinem Buch „When the rivers run dry“ beschreibt der Journalist Fred Pearce die „anfassbare“ Beweise der globalen Wasserkrise. An mehrfachen Beispielen zeigt er, dass die Bestandssysteme bereits heute die Anforderungen der Menschen nicht erfüllen können (die vorhandenen Grundwasserbrunnen müssen aufgrund sinkenden Grundwasserniveaus immer tiefer gebohrt werden, die Dämme an den Flüssen verursachen bei niedrigem Wasserstand Wasserknappheit in den Regionen im unteren Teil des Flusses etc.) [14]. Somit ist es besonders wichtig für die Städte, nachhaltige Konzepte mit alternativen Wasserquellen zu implementieren, um den Wasserbedarf so weit wie möglich zu reduzieren und den natürlichen Ressourcen Zeit zur Regeneration zu geben. Zur Erarbeitung von nachhaltigen Konzepten ist ein grundlegendes Verständnis des hydrologischen Wasserzyklus erforderlich. Abbildung 4 zeigt nachhaltige Lösungen für Wassermanagement (z. B. Grundwasseraufladung durch behandeltes Abwasser), die eine Basis für die Planung einer zukünftigen Wasserversorgung bilden.

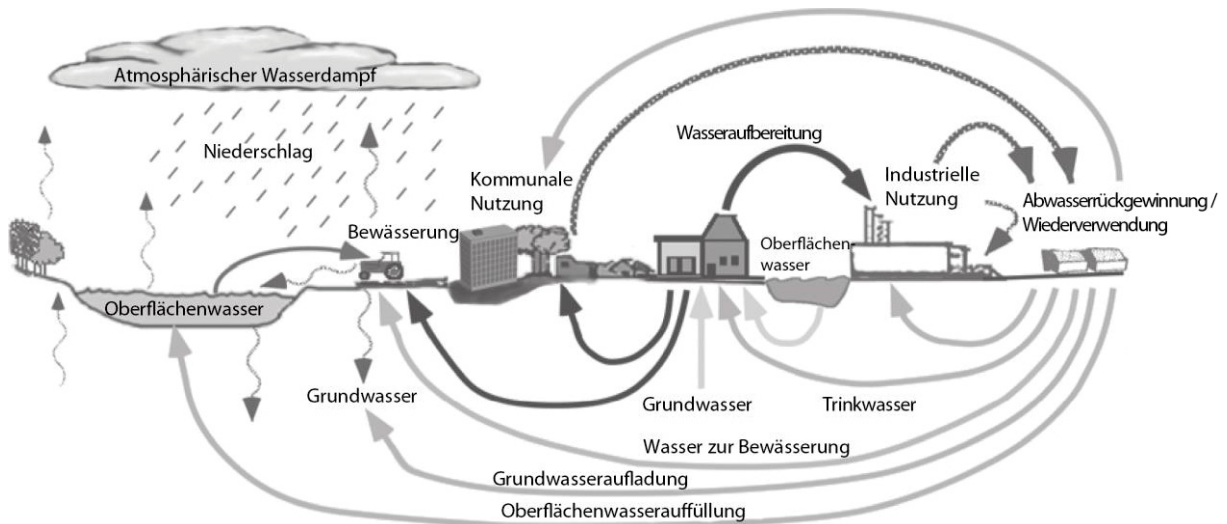


Abbildung 4: Natürlicher hydrologischer Wasserzyklus, [8, S. 203]

Bei der zukünftigen Wasserversorgung im urbanen Raum sind grundsätzlich drei Begriffe von Bedeutung: Reduktion, Wiederverwendung und Recycling und deren Hierarchie, wie in der Abbildung 5 abgebildet.

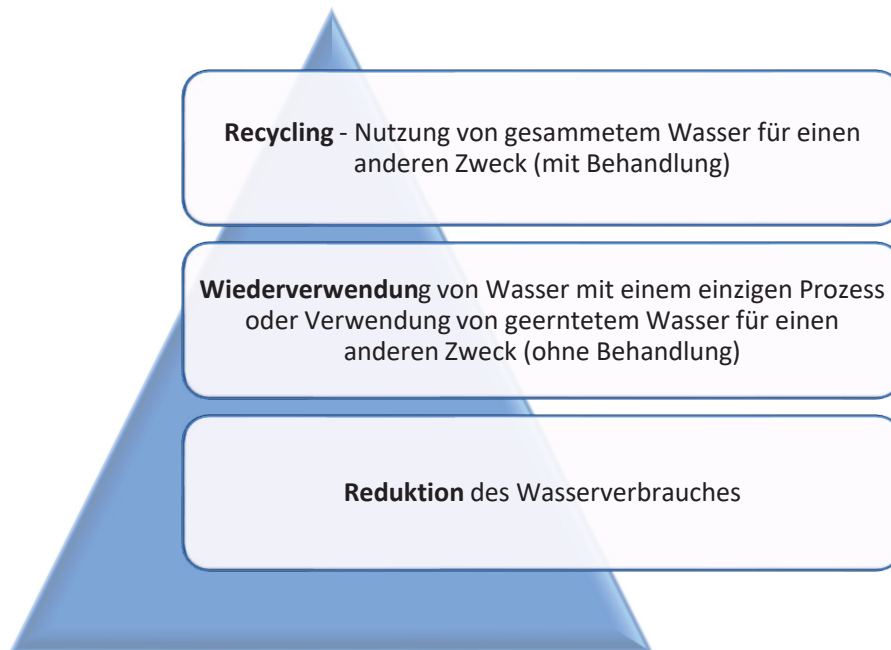


Abbildung 5: Wasserschutzhierarchie für alternative Wasserquellen, [15]

In Abhängigkeit von der Region und dem Projektstand sind entsprechende Maßnahmen oder Maßnahmenkombination in der Planung zu berücksichtigen.

## REDUKTION:

Die Basis eines nachhaltigen Wassermanagements ist die Reduktion des Bedarfs. Diese Maßnahme lässt sich sowohl im Bestand als auch in Neubau umsetzen und umfasst organisatorische und bauliche Aktionen:

- Das Verbrauchsmanagement Strategien durch organisatorischen Maßnahmen umfassen Rabatt-, Wassererhaltungs- und Bildungsprogramme um den Menschen zur Wasserverbrauchsreduktion zu befördern [1, S. 130]. Ein Beispiel dafür ist der Weltwassertag, der jährlich am 22. März gefeiert wird. An diesem Tag wird die Aufmerksamkeit auf die aktuelle Wassersituation in Form von verschiedenen Veranstaltungen und soziale Aktionen gelenkt [16], [17].
- Die baulichen Maßnahmen umfassen vor allem den Einbau von effizienten Anlagen und Geräten um den Wasserverbrauch zu minimieren. Heutzutage sind die Toiletten mit zwei Spülmengen, Zeitsensoren in Waschbecken, wasserlose Urinale sowie wassereffiziente Waschmaschinen und Geschirrspüler die wichtigsten und weit verbreiteten Maßnahmen zur Reduktion des Bedarfes.

## WIEDERVERWENDUNG:

Das Wiederverwendung von Wasser ist die wiederholte Verwendung von Wasser (ohne bzw. mit geringer Behandlung), so dass die Ressource nicht nach dem ersten Gebrauch verworfen wird [8, S. 115]. Es wurde als ökoeffizienter Weg zur Reduzierung von Wasserverbrauch eingeführt und ist in vielen Städten eine wachsende Praxis, die eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung unterstützt [8, S. 16]. Ein System zur Wiederverwendung von Wasser erfordert oft einen zusätzlichen baulichen Eingriff in die Konstruktion bzw. bestehende Leitungssysteme und ist somit in Bestandsgebäuden nur bedingt einsetzbar (z. B. als Aufputz Installation). Die ausführliche Funktionsweise des Konzepts wird in dem Kapitel 3 beschrieben.

## RECYCLING:

Wasserrecycling bedeutet Umwandlung des Abwassers (Grau-, Gelb- und Schwarzwasser) in ein hochqualitatives Trinkwasser, das erneut im Wasserzyklus genutzt werden kann. Die Abwasserbehandlungstechnik nutzt den grundlegenden Prozess der physikalischen, biologischen und chemischen Desinfektion, um die Verunreinigungen aus dem Abwasser zu entfernen. Diese Prozesse können im primäre (physikalische), sekundäre (biologische) und tertiäre (chemische) Behandlung erfolgen. Sehr wichtig ist dabei der Kostenfaktor. Die Tertiärbehandlung ist in der Regel sehr kostenintensiv und wird dadurch aus finanziellen

Gründen oft nicht praktiziert [8, S. 114]. Eine effiziente und effektive Lösung bietet das Prinzip „fit-for-purpose“, dass die Anpassung der Behandlungsstufe auf die tatsächliche Nutzung (z. B. Nutzung des Regenwassers zur Toilettenspülung oder Gartenbewässerung) vorsieht. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu unterscheiden, wo welche Wasserqualität eingesetzt werden darf. Das wird in dem Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Nach Schätzungen kann dieses Prinzip einen bedeutsamen Beitrag für die globale Wassereffizienz leisten [8, S. 9].

Das Thema Wasserrecycling kann heutzutage nicht ohne Betrachtung der Wasserqualität und eventueller Wasserverschmutzung erfolgen. Global gesehen ist die Verschmutzung der urbanen Wasserquellen eine der Hauptursachen für wasserbürtigen Krankheiten, die wiederum für eine erhöhte Sterberate in städtischen Gebieten verantwortlich sind [8, S. 100]. Um das Risiko des Wasserrecyclings zu minimieren, wurde eine Hierarchie für die Nutzung unterschiedliche alternative Wasserquellen in Abhängigkeit von deren Kontaminierungsgrad sowie Energiebedarf und Kosten (Behandlungsanlagen bzw. Systeme) bei der Wiederverwendung erstellt. Diese ist in Abbildung 6 dargestellt.

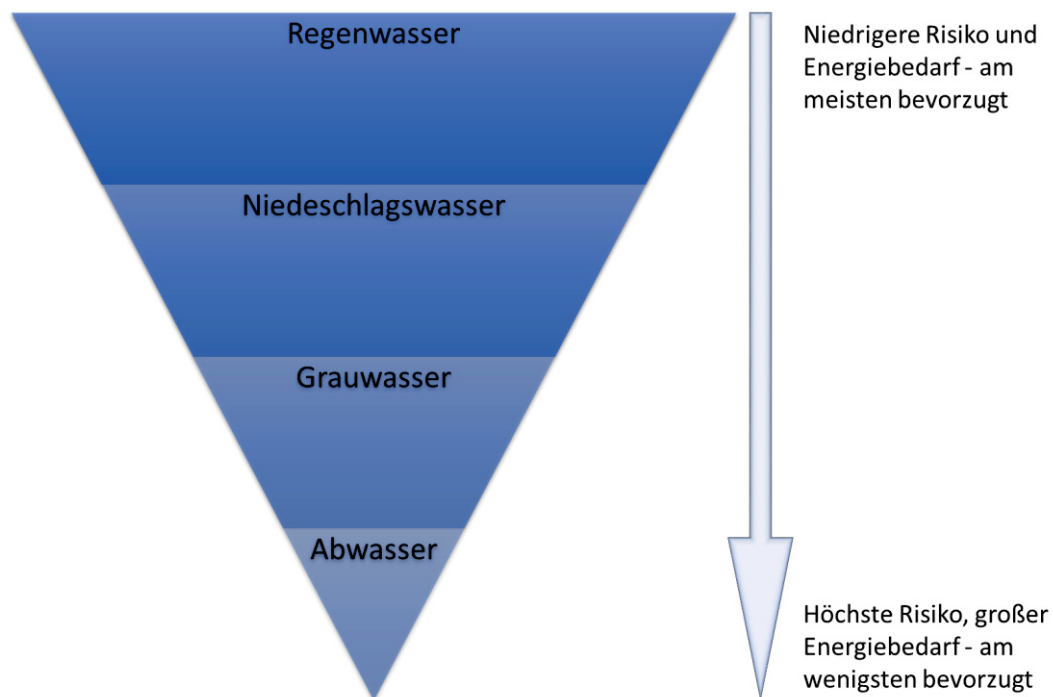


Abbildung 6: Hierarchie für die Nutzung alternativen Wasserquellen, [15]

Im Hinblick auf die akute Wasserkrise in der Welt sind die Wasserversorgungssysteme immer mehr auf alternative Quellen angewiesen und deren Implementierung ist die einzige Möglichkeit für eine nachhaltige Entwicklung.

## 2.3 MÖGLICHKEITEN ZUR REGENWASSERBEWIRTSCHAFTUNG IM URBANEN RAUM

Im Kontext der Wasserwirtschaft wird Nachhaltigkeit als "Koordinierte Entwicklung und Bewirtschaftung von Wasser, Land und Ressourcen, um das wirtschaftliche und soziale Wohlergehen in einer gerechten Weise zu maximieren, ohne die Nachhaltigkeit der lebenswichtigen Ökosysteme zu beeinträchtigen" definiert [18]. Diese Bestrebungen in der städtischen Entwicklung sind heutzutage als Low Impact Development (LID), Water-Sensitive Urban Design (WSUD) oder Sustainable urban Drainage System (SuDS) bekannt [8, S. 550f].

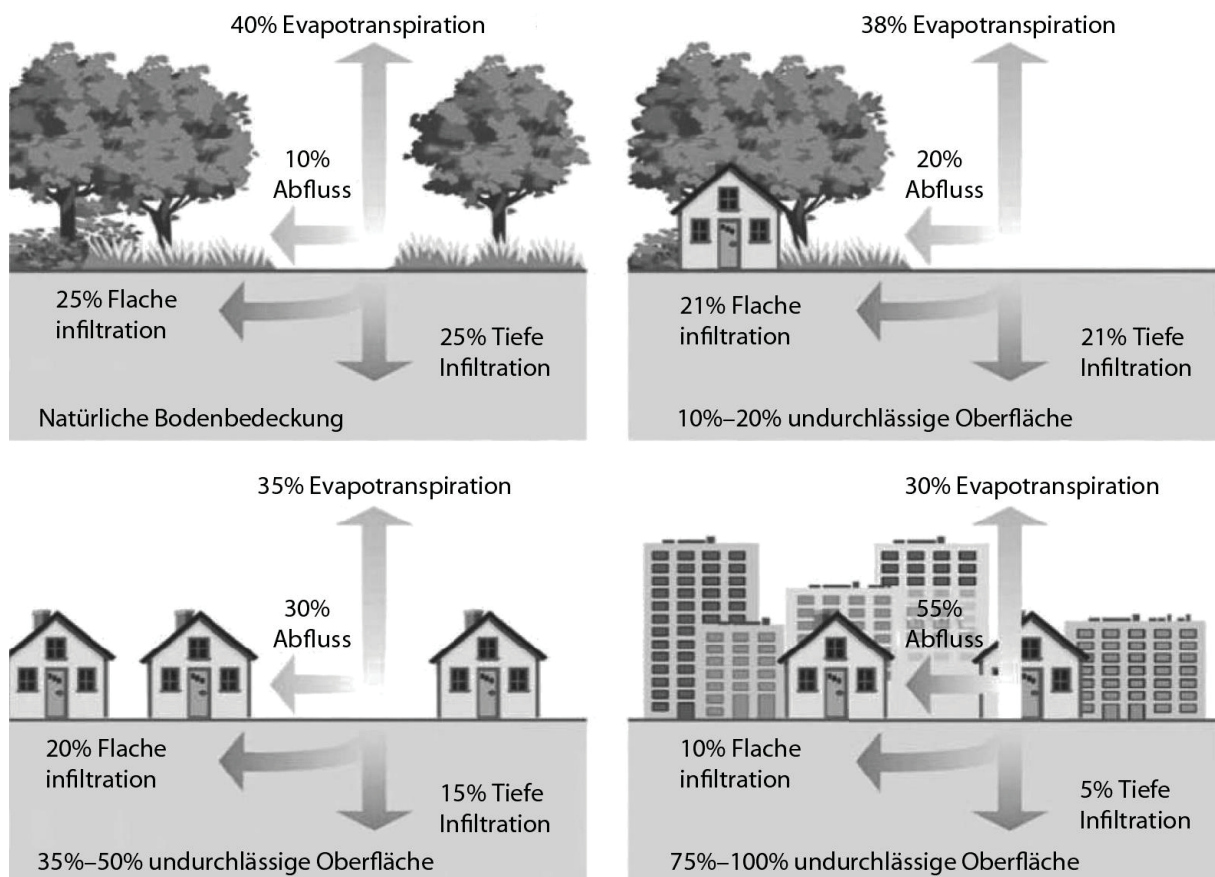


Abbildung 7: Einfluss der Urbanisierung auf natürlicher hydrologischer Zyklus, [8, S. 793]

In Abbildung 7 ist der Einfluss der Urbanisierung auf natürliche hydrologische Zyklen dargestellt. Durch die städtische Entwicklung wird die Durchlässigkeit der Landoberflächen verringert, indem den freien Abflussboden durch undurchdringliche Dächer, Straßen und gepflasterte Bereiche ersetzt wird. Somit ist die Menge an Wasser, die in den Boden infiltrieren kann, reduziert und die Geschwindigkeit, mit der Wasser von der Oberfläche abläuft deutlich erhöht [19, S. 1–4]. Deswegen stellt sich das Niederschlagswasserabflussmanagement als größte Herausforderung in den städtischen Gebieten [20, S. 6]. Das konventionelle städtische



Regenwassermanagement fokussierte auf die Bereitstellung einer effizienten Entwässerungsinfrastruktur, um den Abfluss schnell zu sammeln und zu entfernen. Diese Systeme sind ständig mit riesigen Investitionskosten und Schadstoffkonzentrationen besonders in Mischkanäle (Regen- und häusliche Abwasser) verbunden. Die nachhaltigen Entwässerungssysteme versuchen das Niederschlagswasser direkt an der Quelle zu verwalten, und somit eine sowohl qualitative als auch quantitative Lösung anzubieten. Das Ziel ist dabei, die Regenwasserbewirtschaftung auf lokaler Ebene zu lösen, und eine planerische Harmonie zwischen der Stadtgestaltung, der Landschaftsarchitektur und der Bewässerungsinfrastruktur zu gestalten [8, S. 551, 555, 794]. Je nach Projektanforderungen, umwelt- und städtebaulicher Umgebung, regionalen Vorschriften und standortbedingten Beschränkungen sind entsprechende Methoden der LID-Systeme oder deren Kombinationen anzuwenden [8, S. 39, 553]. Die Versickerungsanlagen sind zentral oder dezentral zu planen unter besondere Berücksichtigung der maximalen Speicherfähigkeit, des vorhandenen und erforderlichen Flächenbedarfes, sowie der hydraulischen Beschickung. Der gestalterische Aspekt sollte bei der Erstellung eines nachhaltigen Konzepts nicht vernachlässigt werden.

Im Folgenden wird auf Systeme wie Gebäudebegrünung (Dach- und Fassade), Flächen- und Muldenversickerungsanlagen, Versickerungsbecken sowie Rigolen näher eingegangen, weil diese Arten besonders im urbanen Raum ihren Einsatz finden können.

## GRÜNDÄCHER

Ein Gründach, also ein mehrschichtiges System, das das Dach eines Gebäudes bedeckt [19, S. 6–4], stellt heutzutage besonders vorteilhafte Mittel zur Beeinflussung des städtischen Klimas durch die Reduktion des Heat-Island-Effekt, Lärm- und Schadstoffabsorption sowie die Verbesserung der Luftqualität. Im Vergleich zu anderen nachhaltigen Lösungen zur Regenwasserbewirtschaftung ist hier kein Land erforderlich und können auch in dicht bebauten urbanen Gebieten umgesetzt werden. Das System verbessert gleichzeitig auch die Energieeffizienz eines Gebäudes durch die Verringerung der solaren Gewinne, erhöht die Langlebigkeit der Dachkonstruktionen und bietet Grünflächen für passive Erholung und verbesserte Ästhetik des Lebensraumes. Aus Sicht der Wasserwirtschaft wirken die Gründächer vor allem attraktiv auf die Wasserqualität und den Wasserhaushalt, da diese eine Möglichkeit zur Zwischenspeicherung des Regenwassers sowie dank deren Filterfunktion, zur Rückgewinnung vom Wasser hoher Qualität bieten. Weiterhin werden durch diese Systeme



neue Lebensräume für Pflanzen und Tiere geschaffen die die Biodiversität in der Stadt unterstützen [8, S. 795], [19, S. 6–4].

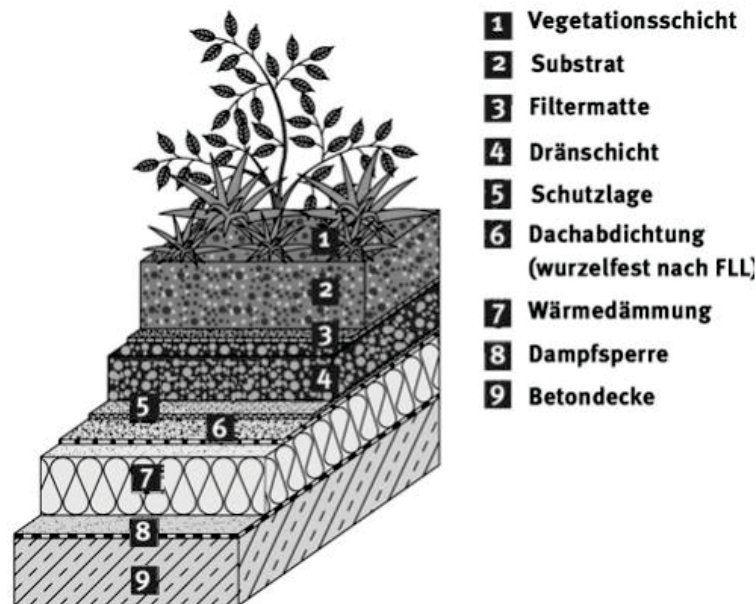


Abbildung 8: Eine funktionale Aufbau des Gründaches auf dem Beispiel eines Warmdaches, [21]

Prinzipiell bestehen die Gründächer aus vier funktionalen Schichten: Vegetationsschicht, Substrat, Filter und Dränschicht, die auf der Dachkonstruktion aufgebracht werden, wie in der Abbildung 8 zu sehen ist. In Abhängigkeit von der Größe der Vegetations- und Substratschicht werden zwei Hauptarten der Gründächer unterschieden: intensiv und extensiv [19, S. 6–5].

- **Extensive Gründächer** bestehen typischerweise aus einer 25 mm bis 125 mm dicken Grünschicht, robusten, trockentoleranten Pflanzen - normalerweise Moosen, Sukkulenten, Kräutern oder Gräsern. Diese Art ist leicht und kostengünstig, eignet sich sowohl für Bestands- als auch für Neubauten und für jede Dachform (Flach- und Schrägdächer). Das System bietet bis zu 20 % (bezogen auf Substratvolumen) Wasserspeicherkapazität bei minimalem Wartungsaufwand [19, S. 6–5, 6–7].
- **Intensive Gründächer** auch als Dachgärten bezeichnet, sind landschaftlich gestaltete Umgebungen, optional auch für Fußgängerverkehr geeignet, die auf der Dachkonstruktion angebracht sind. Deren Aufbau besteht in der Regel aus mehr als 15 cm tiefen Substratschicht, die mit tief verwurzelten Pflanzen geplant werden kann [19, S. 6–5]. Das System bietet eine Speicherkapazität für Regenwasser von 45 %-65 % (bezogen auf Substratvolumen) [19, S. 6–7]. Die Dachkonstruktionen für intensive Gründächer erfordern eine deutlich höhere Tragfähigkeit, was sich in den Gesamtkosten und die Komplexität des Entwurfes widerspiegelt [19, S. 6–5]. Ein immer weiter verbreiteter Trend in den Städten ist das sogenannte „Urban Gardening“. Diese Idee wurde bereits in den 70er

Jahren mit den Gemeinschaftsgärten in New York praktiziert, heutzutage wird jedoch auf die Dachlandschaft ausgebreitet [22]. Das Konzept der städtischen Landwirtschaft unterstützt die Nachhaltigkeit, indem es das soziale Kapital, das Wohlbefinden der Gemeinschaft und das zivile Engagement im Lebensmittelsystem erhöht [23].

## FASSADENBEGRÜNUNG

Der Begriff „Fassadenbegrünung“ oder „Vertikalbegrünung“ bezeichnet Vegetation, die auf oder gegen senkrechte Flächen wachsen. Die Systeme können im Freien oder im Innenbereich, im Bestand und Neubauten, auf jeder Art von vertikaler Oberfläche angebracht werden (Fassaden, Mauer oder freistehende Unterstützung). Es werden zwei Hauptkategorien der Vertikalbegrünung unterschieden, wie in der Abbildung 9 dargestellt: Begrünte Fassaden und so genannte „Living Walls“ (lebende Wände). Beide Konzepte bieten für die Stadtbewohner sowie für das Gebäude zahlreiche ökonomische, ökologische und soziale Vorteile, z. B. die Luftverschmutzung in der Stadt wird durch die Absorption von Staub reduziert [24, S. 5]. Gleichzeitig werden durch die Vegetation Schattenbereiche erschaffen, die zusammen mit der Evapotranspirationsfähigkeit die Temperatur des Gebäudeinneren steuern [24, S. 5]. Weiterhin bieten die Systeme ein breiteres gestalterisches Spektrum auch in den dichten urbanen Gebieten [25].

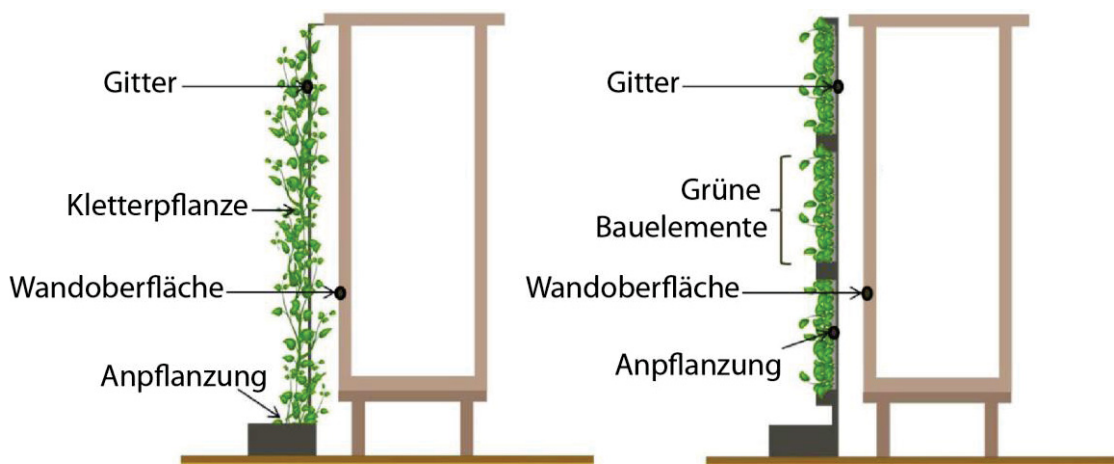


Abbildung 9: Aufbau von Begrünter Fassade (links) und Living Walls (rechts), [24, S. 2]

- **Begrünte Fassade** – besteht grundsätzlich aus Kletter- oder Hängepflanzen, die entweder direkt auf der Wand oder auf einer zusätzlichen Gitterkonstruktion wachsen. Die Systeme basieren auf einem im Freien, im Boden verwurzelten Kletterpflanze und benötigen keine zusätzliche Bewässerung [25]. Traditionell wurden die grünen Fassaden direkt auf der Gebäudewand aufgebracht. Diese Praxis der Landschaftsgestaltung ist typischerweise mit Schäden an den Fassadenmaterialien,

Tieranziehung und hohen Wartungskosten verbunden. Aus diesem Grund wurden in letzter Zeit verschiedene Systeme entwickelt, die sich technisch und konzeptionell in Bezug auf die traditionellen entwickelt haben, jedoch keinen negativen Einfluss auf das Gebäude auswirken (z. B. Hilfskonstruktionen aus Gitter) [26].

- **Living Walls** - Die lebenden Wände bestehen aus Baumodulen oder geotextilen Filzen, die manchmal vorkultivieren, die an einer vertikalen Hilfskonstruktion oder an der Wandstruktur befestigt sind. Diese Systeme werden in verschiedenen Größen und mit unterschiedlichen Vegetationsarten angeboten. Zu beachten ist hier jedoch ein relativ hoher Bewässerungs- und Wartungsaufwand [26].

Die Gebäudebegrünung ist durch die Erzeugung von Verdunstungskälte und der damit verbundenen Minimierung der Temperaturen im engeren Gebäudeumfeld sowie der Senkung des Energieverbrauchs bei der Gebäudeklimatisierung, ein wesentliches Element in der Energiebilanz eines Gebäudes [27, S. 8]. In den letzten Jahren wurden mehrere Studien durchgeführt, um den Einfluss von Grünen Wände auf Energieeinsparung im Gebäude zu untersuchen. Berücksichtigt wurden Mechanismen wie: Reduktion von Sonnenstrahlung durch den durch die Vegetation erzeugten Schatten, Wärmedämmung durch Vegetations- und Substratschicht, Verdunstungskühlung durch Evapotranspiration aus den Pflanzen und eine Windsperre. In dem Experiment zur Untersuchung des Einflusses von Vertikalbegrünung auf Raumtemperatur in Gebäudeinneren, durchgeführt in 2014 an der Universiti Teknologi Malaysia, wurden die Temperaturreduktionen von 4.0 °C (Living Wall) und 3.0 °C (Grüne Fassade) gemessen [24, S. 2].

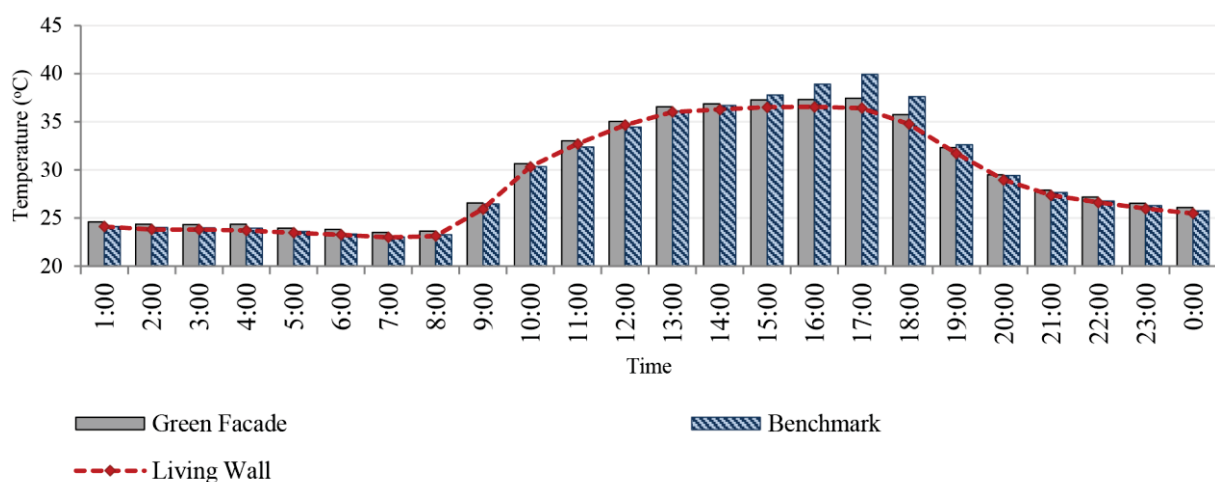


Abbildung 10: Einfluss der Fassadenbegrünung auf durchschnittliche Raumtemperatur, Ergebnisse der Messung in dem Zeitraum 26.05.2013-19.06.2013 in Malaysia

Abbildung 10 stellt die Ergebnisse der Temperaturmessung im Zeitraum 26.05.2013-19.06.2013 in Malaysia dar. In dem Diagramm wurden die durchschnittlichen Temperaturen bei einer Grünfassade, Living Wall und ohne Fassadenbegrünung aus dem gesamten Messzeitraum für jede Tagesstunde verglichen. Als Benchmark wurde dabei die Raumtemperatur im Gebäudeinneren mit einer einfachen Fensterlüftung angenommen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Vertikalbegrünung vor allem in den Nachmittagsstunden (15:00 - 19:00 Uhr) für eine deutliche Temperaturreduktion in dem Raum sorgt. Die Messungen wurden in einer warmen und humiden Region durchgeführt, zu beachten ist jedoch, dass die Funktionalität des Systems von vielen Einflussfaktoren wie lokalem Klima, Bewässerung, Ausrichtung und Wartungsintervallen abhängt.

### VERSICKERUNGSBECKEN

Unter Versickerungsbecken versteht man in der nachhaltigen Wasserbewirtschaftung Teiche, Feuchtgebiete oder Sedimentbecken die als Strömungsdämpfungsmechanismen, Sedimentationen und in einigen Fällen Filtrationen (Entfernung von Schadstoffen) für das städtische Regenwasser funktionieren [8, S. 554]. Für eine gute Arbeitsleistung der Systeme ist eine ausreichende und gesicherte Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes erforderlich. Eine geringere Durchlässigkeit würde zu langen Einstauzeiten führen und damit die Entleerungszeiten deutlich verlängern [28, S. 28]. Es sind zwei Arten zu unterscheiden:

- **trockene Becken** – dienen als Zwischenspeicher für Starkregenereignisse. Das Niederschlagswasser wird vorübergehend gespeichert und somit ein Teil des Abflusses abgeschwächt. In den Trockenzeiten bietet das System öffentliche Freiflächen für Erholungszwecke [8, S. 39].
- **feuchte Becken** – sind Gewässern mit Einstauhöhen von mehr als 0,5 m [28, S. 9], die für eine vorübergehende Lagerung für zusätzlichen Sturmabfluss sorgen, sowie die Wasserbehandlung von Niederschlagswasser sicherstellen [8, S. 554]. Durch die Sedimentationsprozesse (verstärkt durch marginale Bepflanzung) werden lösliche Schadstoffe biologisch entfernt. Weiterhin bilden die Versickerungsbecken einen ästhetischen und ökologischen Vorteil für urbane Räume, die gleichzeitig als wichtiger Lebensraum für Fauna und Flora dienen [8, S. 39].

Die Versickerungsbecken bieten eine vorteilhafte und ästhetische Lösung für urbanes Wassermanagement, da die doppelte Funktion von Zwischenspeicher für überschüssigen Niederschlag und System zur Grundwasserneubildung übernehmen können. Aufgrund des großen Flächenverbrauches, sind die Anlagen nur bedingt im urbanen Gebieten anzuwenden

(z. B. im städtischen Parks etc.). Besonders wichtig für eine einwandfreie Funktionalität ist die regelmäßige Instandhaltung, da die Schwebstoffe die sich im Untergrundbereich ablagern, dort dichtende Auflagen bilden und dadurch die Versickerungsfunktion verhindern [28, S. 28]. Auch die Kolonisation durch invasive Arten muss immer verhindert werden. Weiterhin müssen in öffentlichen Bereichen die Gesundheits- und Sicherheitsrisiken betrachtet werden, was oft zu Isolation bzw. Abgrenzung des Teiches führt [19, S. 17–1].

### FLÄCHENVERSICKERUNG UND VEGETATIONSTREIFEN

Die Flächenversickerung erfolgt in der Regel durch Grünanlagen (Rasenflächen, bepflanzte Bereiche) und kommt der natürlichen Versickerung am nächsten. Aufgrund des Eintrages von mineralischen und organischen Feinanteilen, nimmt die Durchlässigkeit des Bodens mit der Zeit ab. Somit können auch von durchlässigen Flächenbefestigungen Wasserabflüsse auftreten, die jedoch deutlich geringer sind, als diese von den undurchlässig befestigten Flächen [28, S. 24]. Deswegen sind die Flächenversickerungsanlagen oft lediglich ein Teil einer Kombination von mehreren SuDS-Systemen.

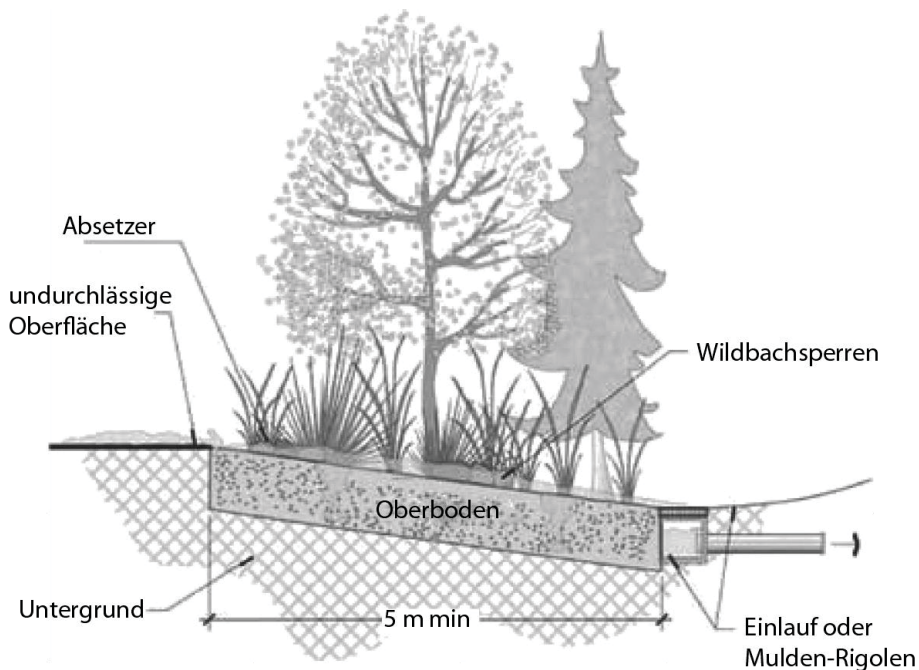


Abbildung 11: Ein Beispiel für Vegetationsstreifen, [8, S. 798]

Eine besonders im urbanen Räumen verbreitete Art der Flächenversickerungsanlagen bieten die Grün- bzw. Vegetationsstreifen - breite, sanft abfallende und flache Kanäle, die von Gras oder einer anderen geeigneten Vegetation bedeckt sind [8, S. 554]. Diese werden meistens am Rand von Terrassen-, Hof- und Verkehrsflächen angeordnet [28, S. 24] und dienen der Abflussminderung von Niederschlagswasser sowie als Filter für suspendierte Sedimente



und damit verbundene Schadstoffe [8, S. 796]. Ein beispielhafter Aufbau des Systems ist in Abbildung 11 dargestellt.

Besonders wichtig bei der Planung von Vegetationsstreifen ist, einen linienhaften und gleichmäßigen Übergang des Wassers auf die Versickerungsfläche, sowie eine dauerhafte gleichmäßige Beschickung [28, S. 24]. In den urbanen Raum bieten diese Anlagen ein funktionales und ästhetisches Element der Landschaftsgestaltung [8, S. 797].

## MULDENVERSICKERUNG UND BIORETENTION

Unter einer Versickerungsmulde versteht man eine flache, geformte Geländemulde, die zur Versickerung von Niederschlagsabflüssen mit zeitweiliger oberirdischer Speicherung genutzt wird [28, S. 9] [12, S. 798]. Entsprechend geplante und dimensionierte Mulden, die sich am Straßenrand befinden, können als Ersatz für die konventionellen Rinnen und Entwässerungsröhre gesehen werden [19, S. 10–1]. In dem Fall, dass die verfügbare Fläche oder Durchlässigkeit des Untergrundes für eine Flächenversickerung nicht ausreichend ist, kommt die Muldenversickerung zur Anwendung. Das System eignet sich besonders gut für ein nachhaltiges Siedlungskonzept, da es keinen großen Aufwand bei der Wartung benötigt und im Vergleich zu anderen Systemen besonders kostengünstig bei der Herstellung ist [28, S. 24ff]. Die Bioretention ist eine Erweiterung der Mulden- und Flächenversickerungssysteme, indem das Regenwasser durch Filtermedien, wie lehmiger Sand behandelt wird. Das Konzept der Mulden mit Bioretentionsfunktion basiert auf Zwischenlagerung des Regenwasserabflusses (vor allem die erste Spülung, die eine höhere Konzentration an Schadstoffen enthält) bis auf eine bestimmte Einstauhöhe (30 cm – DWA-A 138) und deren Infiltration, wobei die Schadstoffe durch die Feinfiltration in gewissem Umfang entfernt werden (hier vor allem die Schwermetalle) [28, S. 24] [8, S. 796] [8, S. 554].

In Abhängigkeit vom geplanten Zweck, der verfügbaren Versickerungsfläche oder bei nicht ausreichender Durchlässigkeit des Untergrundes für eine Flächenversickerung [28, S. 24–25] werden drei Bautypen des Systems unterscheiden:

- **Muldenversickerung** – dient einer vollständigen Infiltration von Niederschlagswasser. Der Aufbau basiert auf einem Graben mit Vegetation und einem porösen Boden. Die oberste Schicht besteht aus durchlässigem Boden mit Pflanzen [8, S. 39], die zu Bioretentionszwecken um eine Filterschicht erweitert sein kann [8, S. 796]. Weiterhin kann

unterhalb der ersten Schicht eine andere Infrastruktur aufgebaut werden, wie z.B. Schicht aus Kies oder eine Rigole [8, S. 40].

- **Mulden-Rigolen-Element** - besteht aus begrünter Mulde mit darunter liegender Rigole [28, S. 9]. Grundsätzlich handelt es sich dabei um zwei getrennte Zwischenspeicher mit jeweils eigenen Füll- und Entleerungsprozessen. Das System ist Beispielsweise bei geringer Durchlässigkeit einsetzbar, jedoch unter Berücksichtigung, dass die Einstauzeiten in den Mulden begrenzt bleiben, um eine Schädigung der Vegetation in der Mulde zu vermeiden. Aus diesem Grund sollte die Einstauhöhe 30 cm nicht überschreiten, dazu ist eine Entlastungsmöglichkeit der Mulden durch einen Überlauf zwischen Mulde und Rigole zu planen [28, S. 25].
- **Mulden-Rigolen-System** sind mehrere Mulden-Rigolen-Elemente, die mit Hilfe einer Drosseleinrichtung das in den Rigolen gespeicherte Wasser in einem vernetzten System ableiten können [28, S. 9]. Dies ist besonders bei einer niedrigen Durchlässigkeit des Untergrundes ( $k_f < 10^{-6}$  m/s), wo die geringe Versickerungsrate nicht mehr vollständig durch eine Zwischenspeicherung der Abflüsse ausgeglichen werden kann und eine zusätzliche Ableitung erforderlich ist [28, S. 28]. Es handelt sich um eine dezentrale Konzeption, wobei die mögliche Netzstruktur des Systems zentrale Merkmale aufweist. Das System bietet eine sehr große Speicherfähigkeit beim sehr geringen Infiltrationsmengen [28, S. 24]. Durch Anwendung einer Bioretentionsschicht und Verhinderung des Versickern des Wassers in den Untergrund (z. B. durch eine undurchlässige Schicht), kann diese Anlage zur Filtration und Ableitung von Wasser zum ausgewiesenen Speicher und somit als Teil eines Regenwassergewinnungssystems dienen [8, S. 796].

## RIGOLENVERSICKERUNG

Rigolen sind rechteckige oder kreisförmige Pufferspeicher, der linien- oder flächenförmig, unterirdisch verlegt und mit porösem, speicherfähigem Material gefüllt sind [8, S. 795] [28, S. 9]. Bei der Rigolenversickerung wird das Niederschlagswasser oberirdisch in eine Rigole geleitet, dort zwischengespeichert und entsprechend der Durchlässigkeit des umgebenden Bodens verzögert in den Untergrund abgegeben [28, S. 26] – wie in der Abbildung 12 dargestellt.



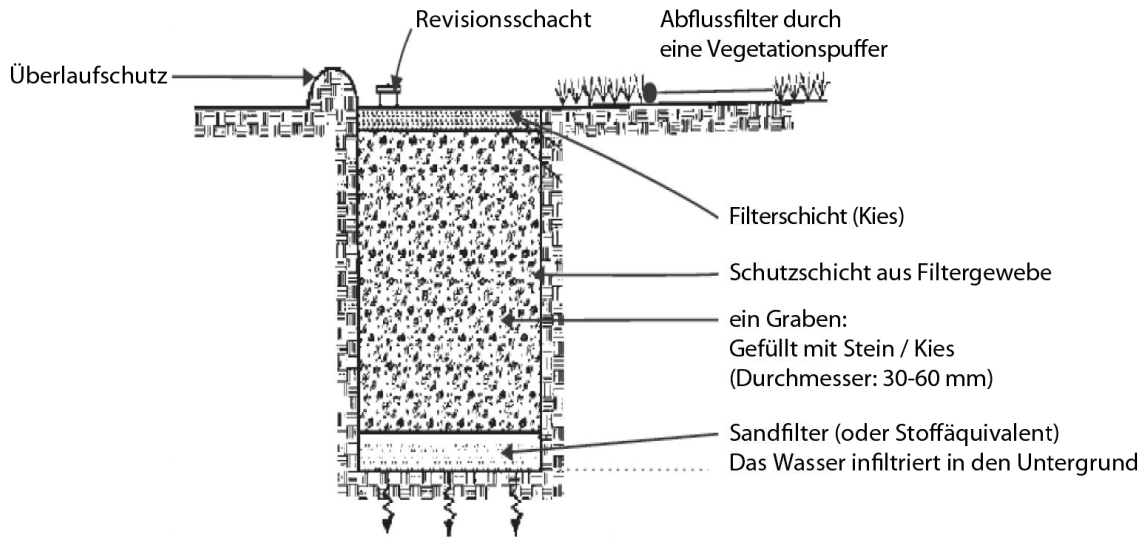


Abbildung 12: Beispielaufbau eines Rigolenversickerungs, [8, S. 796]

Bei der Planung einer Rigolenversickerung ist besonders zu beachten, dass der maximale Abstand von 1,5 m zum Grundwasserspiegel nicht unterschritten ist und dass der erforderliche Abstand (mind. 5,0 m) zu Gebäudefundamenten und Straßen eingehalten wird. Die Systeme sind üblicherweise im Kombination mit Mulden oder perforierten Rohren gestaltet, wodurch die eingehende Geschwindigkeiten und gröbere Sedimente reduziert sind [8, S. 795f].

## 3 WIEDERVERWENDUNG VON WASSER

---

*Dieses Kapitel beschreibt ausführlich die alternativen Wasserquellen. Besonderer Fokus wird hier auf Grau- und Regenwasser gelegt. Es werden Informationen zu Anforderungen, Planungsgrundlagen sowie Einsparpotenziale und Defizite der Systeme gegeben.*

Die meisten menschlichen Aktivitäten mit Wasser erzeugen Abwasser. In Zeiten des Bevölkerungswachstums wächst die Gesamtnachfrage für Wasser und gleichzeitig auch die Menge des erzeugten Abwassers kontinuierlich an [11, S. 1]. Die kommunale Wassernutzung beträgt ca. 11 % des gesamten Verbrauches auf der Erde, wobei geschätzt ca. 80 % dieses Wassers als Abwasser abgeleitet wird [8, S. 18]. Das bietet nach der Umrechnung ca. 330 km<sup>3</sup> Wasser pro Jahr [11, S. 74]. Im Zusammenhang mit der Wassereffizienz wird sehr oft der Begriff „alternatives“ oder „nicht konventionelles“ Wasser genutzt, damit ist das Ergebnis der Wiederverwendung, Recycling oder Rückgewinnung gemeint. Dank dieser Methoden werden unsere Begrenzungen der endlichen Wasserressourcen verlängert, denn je weniger wir jetzt verwenden, desto mehr wird für die Zukunft zur Verfügung stehen [8, S. 114].

Heutzutage sind die Wiederverwendungsanlagen in der Lage, sichere und saubere Wasser für jede Verwendung zu bereiten und sind somit ein wichtiger Faktor für zuverlässiges und effizientes Wassermanagement in den Städten, insbesondere in den ariden Regionen [8, S. 490, 872]. Die Kosten der Anlagen sind ein wichtiger Entscheidungsfaktor, deswegen wird in der Regel das in dem Kapitel 2.2 erwähnte "Fit-for-purpose" - Prinzip angewendet. Dadurch werden die alternativen Wasserressourcen in den Einsatzbereichen genutzt, mit denen die höchste Wirtschaftlichkeit zu erreichen ist [11, S. 4]. Die Systeme können als kleine, dezentrale Lösungen (wie z. B. Regenwasserrückgewinnung), oder als zentrale Anlagen (wie z. B. Kläranlagen) geplant werden. Entsprechend der behandelten Wasserart und voraussichtlicher Nutzung ergeben sich die Vor- und Nachteile [11, S. 3] [8, S. 18], die im Folgenden näher beschrieben werden.

### 3.1 GRAUWASSER

Als Grauwasser werden häusliche Schmutzwasser ausschließlich Abwasser aus Toiletten und Urinalen bezeichnet [29, S. 13][8, S. 120]. Diese umfassen üblicherweise das Wasser aus Duschen, Bäder, Handwaschbecken und Waschmaschinen. Unter diesem Begriff kann auch das

Abwasser aus Küchenspülen und Geschirrspülern bezeichnet werden, diese benötigt jedoch, aufgrund eines hohen Anteils an Nahrungsresten und Fetten, die Behandlungsanforderungen des Schwarzwassers [29, S. 13], [30], [31, S. 6]. Zusätzlich können alle Entladungen in die Kanalisation nach den Reinigungsaktivitäten und der Überfluss aus Schwimmbecken unter diese Kategorie fallen [8, S. 405–406]. Die Grauwassernutzung kann grundsätzlich in allen Gebäuden, die mit o.g. Anlagen ausgestattet sind, geplant werden (also z. B. Häuser und Wohnungen, Einkaufszentren, Freizeiteinrichtungen, Büros etc.) [8, S. 405]. Es dient als sehr zuverlässige alternative Wasserquelle, da es aufgrund der täglichen Körperhygiene kontinuierlich und witterungsunabhängig zur Verfügung steht [31, S. 10]. Die Mengen des zur Verfügung stehenden Wassers variieren zwischen den Aktivitäten für ein und denselben Standort sowie unter Betrachtung verschiedener Orte. Die Variationen treten auf einer stündlichen, täglichen, wöchentlichen und monatlichen Basis auf, was auf die Auswirkungen vieler Faktoren, wie Klima, geographische Lage, Kultur, Gewohnheiten und wirtschaftliche sowie soziale Situationen zurückzuführen ist [8, S. 406].

Das Grauwasser besteht aus mit anderen Zutaten vermishtem Wasser wie z. B. Waschmittel, Desinfektionsmittel, Kleidung, Fasern, Kunststoffe, Sand, menschliche Zellen und Speichel sowie geringfügige Anteile an Urin, Fäkalien, Colibakterien u. a. [8, S. 407], die dessen physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften beeinflussen. Die Hauptbestandteile sind organische, anorganische und biologische Elemente, die unter Verwendung der herkömmlichen Hausabwasserparameter gemessen werden [8, S. 405]. In der Regel ist das Grauwasser im Vergleich zu kommunalen und industriellen Abwässern, wenig verschmutzt und beinhaltet nur minimale Verunreinigungen von Krankheitserregern, Stickstoff, gelösten Feststoffen und Trübungen [8, S. 210] und kann in Abhängigkeit von regionalen Vorschriften, sogar ohne Behandlung zur Toilettenspülung wiederverwendet werden.

### 3.1.1 BESCHAFFUNG UND QUALITÄT

Der Anfall und die Belastung des Grauwassers sind durch die Lebensgewohnheiten der Verbraucher bestimmt, somit muss eine voraussichtliche Anlage zur Nutzung dieser Wasserart im Einzelfall gesondert geplant werden [31, S. 10]. Bei der Planung ist eine gründliche Überprüfung der gesamten Wasserbilanz erforderlich. Besonders wichtig ist dabei eine Zusammenstellung über die notwendigen Qualitätsanforderungen und Mengen für das Brauchwasser an den jeweiligen Einsatzstellen. Dank dieser Vergleiche kann das System

optimiert und möglichst wirtschaftlich angepasst werden. Aus ökonomischer Sicht ist immer die Abhängigkeit zwischen dem Grad der jeweils vorliegenden Belastungen und der Kosten der erforderlichen Aufbereitungsmaßnahmen zu untersuchen [32, S. 6]. In Tabelle 1 wurde eine qualitative Bewertung des Grauwassers aus verschiedenen Quellen und deren Verwendungszweck zusammengefasst.

**Tabelle 1: qualitative Bewertung des Grauwassers, Beispiel: Deutschland [31]**

Quelle des Grauwassers	Belastung [qualitativ]	Verwendungszweck	Aufbereitungsaufwand [qualitativ]
Duschen, Badewannen, Waschbecken,	niedrig	Toiletten Spülung	Niedrig [31, S. 13]
Waschmaschinen	Mittel	Bewässerung	Mittel [33]
Küchenabwasser (Spüle, Geschirrspüler)	hoch	Reinigungszwecke, Waschmaschinen	Mittel hoch [34]
		Schwimmbecken, Körperhygiene, Versickerung, Direkteinleitung in Oberflächengewässern	Hoch [35]
		Trinkwasser	Sehr hoch [36] – TrinkwV 2001 § 17

Bei der Dimensionierung des Grauwasserspeichers sowie Behandlungseinheiten für einen bestimmten Ort sind vor allem die täglichen Strömungsmuster sowie entsprechende Spitzenwerte sehr wichtig. Zum Beispiel kann ein stündlicher Spitzenfaktor aufgrund der Duschaktivität, der täglicher Spitzenfaktor aufgrund der Wäscheaktivität und der monatliche Spitzenfaktor im Sommer auftreten [8, S. 406]. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass das Grauwasser ca. 50 % - 85 % des häuslichen Abwassers bildet [8, S. 405]. Eine quantitative Untersuchung wird in dem Kapitel 4 auf verschiedenen Beispielen durchgeführt. In der Praxis werden die Speicher- und Anlagengrößen anhand von Erfahrungswerten und einer Computersimulation bestimmt [37].

### 3.1.2 ANFORDERUNGEN AN DEN SPEICHER

Die Voraussetzung für ein System zur Grauwassernutzung ist Abflusstrennung zwischen Grau- und Schwarzwasser, wobei eine manuelle Sammlung (z. B. Entleeren des Abflusses vom Waschbecken im Eimer) auch möglich ist. Der Ertrag wird in einem Speicher gesammelt und da entsprechend vorbehandelt. Bei mechanischen Systemen ist die Trennung von Störstoffen

(z. B. Haare) besonders wichtig, da diese zu Verstopfungen und Betriebsstörungen führen können [8, S. 408], [31, S. 17]. Somit sollen auch alle mechanische Einrichtungen wie Pumpen, Filter etc. so geplant werden, dass Reinigungs-, Wartungs- und Reparaturarbeiten ohne Behinderungen durchzuführen sind [31, S. 17]. In der Regel liegt der Betriebswasserbedarf deutlich unter der verfügbaren Grauwassermenge. Jedoch unter gewissen Umständen, kann es zur umgekehrten Situation kommen. In diesem Fall ist eine Nachspeisung (mit Trink- oder Regenwasser) in der letzten Stufe der Grauwasser-Anlage einzuplanen [31, S. 19]. Besonders hier ist zu beachten, dass keine Querverbindung zwischen Trink- und Betriebswasser zugelassen ist. Auch das Rückstauniveau der Abwasserkanalisation ist zu berücksichtigen. Das Gelangen von Abwasser aus dem kommunalen Abwasserkanal in die Grauwasser-Recycling-Anlage muss vermieden werden. Wie bei jedem Speicher sind auch hier die entsprechenden Entlüftungsleitungen sowie Notüberläufe bzw. Ausgleichsbehälter zu planen. Diese dienen dazu, den zeitlich verschobenen Anfall von Grauwasser und den Bedarf an Betriebswasser auszugleichen. Der Aufstellort des Speichers soll möglichst lichtgeschützt ausgewählt werden, um ein mögliches Anlagenwachstum zu vermeiden. Dafür gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: innen liegend im Keller oder außenliegend in einem Schacht [31, S. 17f].

Die Auswahl der Grauwasserbehandlungsanlage hängt von vielen Faktoren ab, wie z. B. Standort, Qualitätsmerkmale des Rohgrauwassers, Kosten, Aufstellraumverfügbarkeit, Standortgeographie, Klima und die beabsichtigte Verwendung des recycelten Grauwassers, die durch regionale oder ländliche Normen, Vorschriften und Richtlinien kontrolliert werden. Grundsätzlich können die Speicher und Aufbereitungssysteme in drei Behandlungsstufen kategorisiert werden [8, S. 409ff]:

- **Primär** – dient grundsätzlich zur Entfernung aller Feststoffe, um ein Verstopfen der Rohre des Transport- und Verteilungssystems zu vermeiden. Es werden physikalische Operationen zur Trennung von unerwünschten Materialien auf der Grundlage der Partikelgröße und Dichten angewendet. Es stellt eine kostengünstige Variante der Behandlung dar, die zusätzlich wartungsarm und nicht platzbedürftig ist [8, S. 409ff].
- **Sekundär** - Behandlung hauptsächlich durch biologische Prozesse zur Entfernung der biologisch abbaubaren Inhaltsstoffe [8, S. 417].
- **Tertiär** - fortgeschrittene Behandlung, die Chemikalien oder physikalische Operationen verwendet, um die Schadstoffe zu entfernen, die nicht durch primäre und sekundäre Behandlungen angegangen werden konnten [8, S. 417]. Die heutzutage verbreiteten

Verfahren zur Abfiltration von Verunreinigungen stellen die Mikro-, Nano- oder Ultrafiltrationen dar. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um ein physikalisches Verfahren zur Filtration von Partikeln und Makromolekülen, Salz- und Härteausscheidungen sowie Mikroorganismen (Algen, Pilze, Bakterien, Viren) aus dem Wasser. Die Systeme der Mikro- oder Ultrafiltration sind jedoch aufgrund der Gefahr eines Membranbruchs als alleiniges Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung nicht geeignet. Oftmals wird zur sicheren Desinfektion des Wassers eine UV-Bestrahlung verwendet, die die Reinigungsleistung deutlich verbessert [38, S. 248]. Aufgrund der hohen Herstellungs- und Betriebskosten sind diese Reinigungsleistung bei dezentralen und kleinen zentralen Systemen nicht als wirtschaftlich gesehen.

### 3.1.3 EINSARPOTENTIALE

Ein Weg um den Gesamtverbrauch zu reduzieren ist Substitution des Trinkwassers, in Bereichen in denen keine Trinkwasserqualität erforderlich ist [31, S. 9]. Das Recycling von Grauwasser stellt in diesem Zusammenhang eine attraktive Alternative, da:

- Die Kosten und der Trinkwasserverbrauch werden reduziert [8, S. 266].
- Der Energieverbrauch wird durch Einsparung des Nettobetrags der Wasserversorgung im ersten Gebrauch reduziert [8, S. 266].
- In vielen Fällen sind die Kosten für die Behandlung von Wasser für Wiederverwendungen, die eine niedrige Qualität verlangen, günstiger als Wasser aus neuen Quellen zu pumpen [8, S. 266].
- Aufgrund der Doppelnutzung des Wassers, wird weniger Abwasser produziert, woraus sich weitere ökologische und ökonomische Potentiale ergeben (z. B. Einsparung der Kosten für Abwassertransport und Behandlung) [30].
- In der Ökobilanz wurde nachgewiesen, dass eine konventionelle Bereitstellung von Trinkwasser in einer Kläranlage Treibhausgasemissionen verursacht, die durch die Nutzung von Betriebswasser vermieden werden können. In Summe kann die dezentrale Grauwasseraufbereitung zusammen mit der Nutzung des Betriebswassers zu einer Einsparung von Treibhausgasemissionen führen [39].

### 3.1.4 DEFIZITE

Zu beachten bei der Grauwasseranlage ist, dass aufgrund reduzierter Qualität das recyceltes Wasser nicht für menschliches oder tierisches Konsum, Haushaltsreinigung, Kochen oder andere Küchenzwecke, Baden und Duschen, Schwimmbäder, Verdunstungskühler, Kinder-Wasserspielzeug oder Sprinkler verwendet werden darf [8, S. 262]. Eine besondere Gefahr stellt die Nutzung eines rohen, unbehandelten Grauwassers, das mit energischen Krankheitserregern kontaminiert werden kann. In dieser Form darf das Wasser sogar nicht zur Bewässerung von Gemüsegärten genutzt werden, da die gefährlichen Mikroorganismen und Keime in das Obst oder in das Gemüse sich ablagern können und ein gesundheitliches Risiko darstellen [8, S. 85]. Weiterhin ist eine Grauwasseranlage mit hohen Installationskosten und -aufwand verbunden. Aufgrund zusätzlicher Wasserleitungen, die zur Funktion des Systems erforderlich sind, ist ein nachträglicher Einbau in Bestandsgebäuden nur bedingt möglich (z. B. bei Wasserleitungen, die Unterputz verlegt sind, ist eine Eingriff in die Gebäudestruktur erforderlich) [40, S. 58].

## 3.2 REGENWASSER

Das Regenwasser ist die primäre Wasserquelle im gesamten hydrologischen Kreislauf [8, S. 117]. Im Allgemeinen ist hier der Niederschlag, also das aus der Lufthülle ausgeschiedene Wasser (z. B. Regen, Schnee, Nebel, Tau) [41, S. 6], das von einer Landoberfläche läuft, bevor es einen natürlichen Wasserkörper erreicht. Das passiert immer, wenn die Niederschlagsrate höher ist, als die Geschwindigkeit, mit der Wasser infiltrieren kann oder wenn der Boden gesättigt ist. Der Abfluss bleibt auf der Oberfläche und fließt in Ströme, Flüsse und schließlich große Gewässer, wie Seen oder den Ozean [8, S. 792]. Somit dient das Regenwasser als Quelle aller Wasserformen (Grundwasser, Oberflächenwasser), die durch die verschiedenen Prozesse der hydrogeologischen Zyklen laufen [8, S. 117]. Weiterhin unterscheidet man in diesem Zusammenhang zwei Begriffe:

- **Regenwasser** - Wasser aus atmosphärischem Niederschlag, das noch keine Stoffe von Oberflächen aufgenommen hat [29, S. 13].
- **Niederschlagswasser** - Regenwasser, das nicht im Boden versickert und von Oberflächen in das Entwässerungssystem eingeleitet ist [29, S. 13].

Im urbanen Raum wird das Niederschlagswasser als Abfluss von städtischen Flächen wie Dächern, Gehsteigen, Parkplätzen, Straßen, Gärten und Parks bezeichnet. Die meisten dieser Abflüsse fließen in Regenwasserabläufe, Bäche oder Flüsse und dienen für die Aufrechterhaltung der gesunden, ökologischen Funktion diesen Systemen. Wie bereits im



Kapitel 2.3 beschrieben ist in den städtischen Gebieten aufgrund eines erhöhten Anteils an undurchlässigen Flächen mit deutlich höherer Abfluss zu rechnen, als in ländlichen Gebieten. Somit kann das Regenwasser einen großen Beitrag zur städtischen Wasserversorgung leisten [8, S. 830f]. In der Regel sind zwei Arten der Systeme zu unterscheiden: passive und aktive Rückgewinnung. Als passiv werden alle Maßnahmen bezeichnet, die im Kapitel 2.3 beschrieben wurden und einer direkten Versickerung des Wassers in den Boden dienen. Eine aktive Rückgewinnung umfasst die Ansammlung des Niederschlages aus den Sammelflächen und eine Lagerung in Zisternen für die spätere Verwendung [8, S. 788].

Der Trend zur Wiederverwendung von Regenwasser hat erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, stellt jedoch eine sehr alte Praxis dar. Die archäologischen Befunde belegen, dass bereits vor 6000 Jahren in China die ersten Wassertanks benutzt wurden. Noch bis Mitte des 20. Jahrhunderts in Europa, war die Regenwassersammlung in vielen Ländern weit verbreitet. Schätzungsweise ab Ende 1960er Jahren wurden die alten Wasserzisternen jedoch nicht mehr gebraucht. Heute sind dank der nachhaltigen Wassermanagementpraktiken die Regenwasserspeichersysteme weiterentwickelt und erneut weltweit verbreitet [8, S. 537].

### 3.2.1 BESCHAFFUNG UND QUALITÄT

Bei den Systemen zur Regenwasserrückgewinnung handelt es sich um Techniken, die das Wasser aus dem Dach sammeln, lagern und entsprechend aufbereiten. Wenn es ordnungsgemäß gesammelt und gelagert wurde, ist das Wasser im Wesentlichen frei von Mineralien und den meisten Schadstoffen, die in Oberflächen- und Grundwasser vorhanden sind [8, S. 809], [42]. Jedoch vor allem im städtischen Räumen gibt es viele Umgebungsbedingungen, wie Luftverschmutzung und die Vogelpopulation, die die Wassermerkmale und -qualität beeinflussen [8, S. 772, 809]. Die Regenwasserqualität steht im Zusammenhang mit der aquatischen Toxizität, die durch verschiedenen anorganischen und organischen Schadstoffe bedingt ist. Deswegen sind entsprechende Aufbereitungsmethoden erforderlich, um eine sichere Qualität für die Wiederverwendung zu gewährleisten [12, S. 772].

Man unterscheidet hauptsächlich zwei Arten der Wasserverschmutzung:

- METEOROLOGISCHE VERSCHMUTZUNG

Aufgrund der Luftverschmutzung werden Schadstoffe, die in Form von Partikeln und Gasen (z. B. Smog, Abgasen etc.) in der Atmosphäre vorhanden sind, in abfallenden Regentropfen gelöst und zur Erdoberfläche transportiert. Diese Verunreinigungen können in drei Gruppen

eingeteilt werden: anorganische (Mineralien, Metalle), organische und mikrobielle Verschmutzungen [8, S. 772].

- **AUSWASCHEN DER SCHADSTOFFE AUS SAMMELFLÄCHEN**

Die Oberflächen sind in der Regel nur wenig kontaminiert. Allerdings durch die Ablagerungen auf den Dachflächen, wie Laubblätter und Tierkot, kommt es zur organischen Belastung des Niederschlagwassers. Diese wiederum wirkt als Nährstoff für das Bakterienwachstum [42]. Mehrere Studien, wie die in Australien, Nigeria und Südkorea zeigten, dass in das Regenwasser, das auf dem Dach gesammelt wurde, Bakterien wie E. coli oder intestinale Enterokokken vorhanden sein können [8, S. 809f]. Die in Nigeria durchgeführte Studie untersuchte den Einfluss des Dachmaterials (jeweils vier Dächer aus Beton, Kunststoff, Aluminium und Asbest) auf die Wasserqualität. Die physikalischen Eigenschaften waren in der Regel gleich. Alle Proben waren geruchsfrei, farb- und geschmacklos. Unterschiedliche Parameter wurden jedoch bei der Wassertemperatur, Trübung, PH-Wert, Härte sowie gelösten Stoffen (Metallen und Mikroorganismen) gemessen. Die Ergebnisse dieser Studie wurden in Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2: Der Einfluss des Dachmaterials auf der Wasserqualität, [42]**

Messgröße	Asbest-dach	Beton-dach	Aluminium-dach	Kunststoff-dach	WHO-Werte
Temperatur [°C]	26,3 - 26,6	26,5 - 26,6	26,6 - 26,8	26,5 - 26,6	<b>20 - 32</b>
Trübung [NTU]	0,4 - 0,8	0,2 - 0,6	0,0 - 0,2	0,2	<b>5,0</b>
PH-Wert [-]	6,58 – 6,94	5,81 – 5,95	6,13 – 6,3	6,14 – 6,45	<b>6,5 – 8,5</b>
Gesamthärte [mg/l]	84 - 86	29 - 31	31 - 39	40 - 50	<b>100 - 300</b>
Chlorid [mg/l]	90	90	80	90	<b>200 - 300</b>
Kupfer [mg/l]	0,03	0,01	0,0	0,02	<b>1 – 2</b>
Eisen [mg/l]	0	0	0	0	<b>0,3</b>
Zink, Sulfat [mg/l]	3	5	100	200	<b>300</b>
Magnesium [mg/l]	30,8 – 38,6	36 – 38,6	20,7 – 24,8	24,9 – 32,3	<b>50</b>
Nitrate [mg/l]	31,9 - 39	3,54– 12,4	5,3 - 11	15,8 – 17,3	<b>50</b>
Coliform [CFU]	1	1	0	1	<b>0</b>

Die empfohlenen WHO-Standardwerte sind bei den meisten Faktoren eingehalten. Die größten Abweichungen zwischen den Proben im Vergleich zu den WHO-Anforderungen (rot markierte Zellen) wurden bei Beton-, Asbest- und Kunststoffdächern im Bereich der enthaltenen Coliformen gemessen. Aus diesem Grund wird trotz eines geringen Kontaminationsgrades immer eine gewisse Behandlung des Regenwassers erforderlich [42].

### 3.2.2 FUNKTIONSWEISE DES SYSTEMS

Unabhängig von seiner Größe oder Komplexität besteht jedes Regenwasserrückgewinnungssystem aus sechs Grundkomponenten [8, S. 776, 788], [41]:

- Einzugsfläche - das effektive Einzugsgebiet von dem der Niederschlag abläuft. Dazu zählen Dächer oder eine andere undurchdringliche Fläche.
- Transportleitungen – Kanäle die das Wasser von der Einzugsfläche zum Vorratsbehälter transportieren (z. B. Rinnen oder Oberflächenabläufe).
- Filter: Komponenten die Sedimente aus dem gefangenen Regenwasser entfernen.
- Lagerung: Zisterne oder Tank.
- Verteilung: liefert das Regenwasser entweder durch Schwerkraft oder mit Hilfe einer Pumpe zu dem entsprechenden Verbraucher.
- Behandlung: Aufbereitungsanlagen bestehend aus Filter und anderen Desinfizierungstechniken, um das Wasser trinksicher zu machen.

Ein Beispiel eines Systems mit einem einfachen Filter, unterirdischen Zisterne und einen Hochbehälter ist in der Abbildung 13 dargestellt.

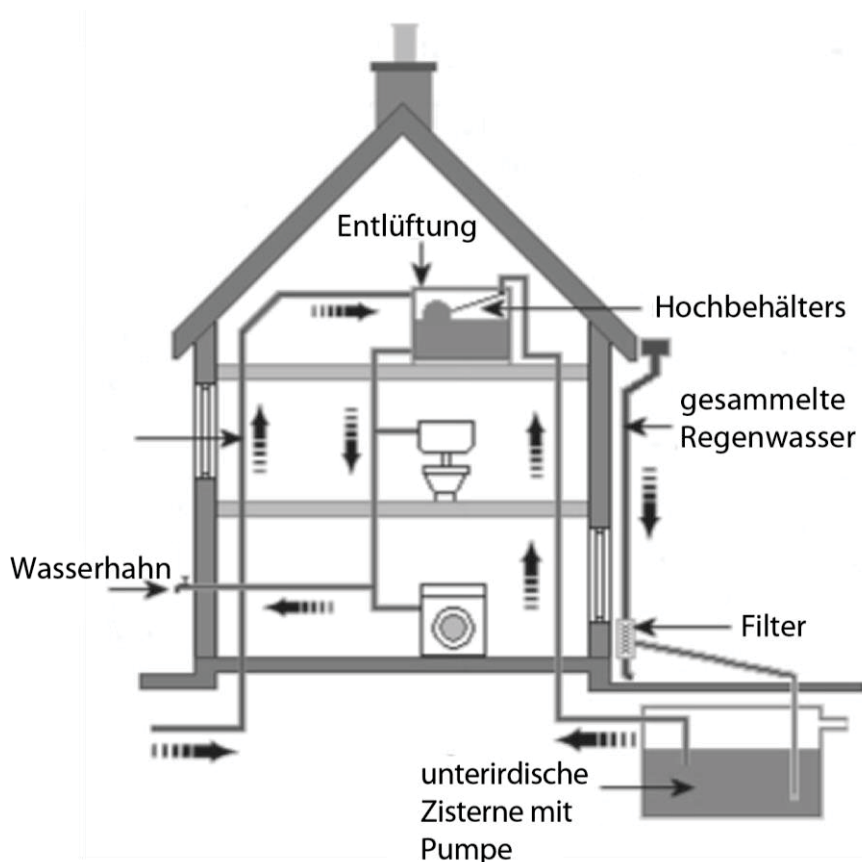


Abbildung 13: Konzept Regenwassernutzung mit unterirdischen Zisterne, [8, S. 540]

Aufgrund der beschriebenen Gefahr der Verschmutzung durch das Abspülen von Schadstoffen aus Einzugsflächen (siehe Kapitel 3.2.1), sind die Regenwasserrückgewinnungssysteme üblicherweise mit einer „First-flush Sicherung“ ausgestattet. Grund dafür ist die nachgewiesene erhöhte Kontamination mit Sedimenten und Schadstoffen (fast 70% der gesamten Schadstoffbelastung) in dem ersten Wasserstrom. Dank dieser Komponente wird der erste Teil des Abflusses (z. B. erste 5 Minuten oder erste 5 mm des Niederschlages) aus dem Dach zurückgehalten oder direkt ins Abwasser entsorgt. Das nachkommende, weniger belastete Wasser wird in den Speicher geleitet [8, S. 537f, 809]. Das letzte Element der Regenwasserrückgewinnung ist ein Reinigungssystem, in dem das gesammelte Wasser aufbereitet wird. Es besteht im Allgemeinen aus Filtrations- (mit Patronenfiltern aus Sand, Aktivkohle oder Membranfiltern) und Desinfektionsverfahren (ultraviolette, keimtötende Sterilisator oder mittels chemischer Behandlungen) [12, S. 540].

Heutzutage sind die modernen Systeme mit neuen Steuerungsinstrumenten, wie webbasierte Informationsströme, Modellierungssoftware und Fernzugriff ausgestattet, was ein nachhaltiges Wassermanagement im Weiten unterstützt. Ein Beispiel dafür ist ein schwimmender Sensor im Speicher, der wenn der Behälter ein Minimum erreicht, automatisch auf die Netzversorgung umschaltet [8, S. 540, 800].

### 3.2.3 ANFORDERUNGEN AN SPEICHER

Die Dimensionierung eines Regenwasserspeichers hängt von vielen verschiedenen Faktoren, wie dem Wasserbedarf, Einzugsgebiet, regional bedingte Niederschlagsmengen und Planung einer weiteren alternativen Wasserversorgung (z. B. Grauwassernutzung), ab. Bei der Planung ist immer mit einzubeziehen, dass der Abfluss von der Oberfläche des Einzugsbereiches abhängt. Beispielweise ist bei den Gründächern lediglich mit einem 50 % Abfluss zu rechnen, der nach einer langen Trockenzeit sogar vollständig auf dem Dach verdunsten kann [41, S. 10]. Eine quantitative Dimensionierung wird auf verschiedenen Beispielen im Kapitel 4 durchgeführt.

Ein Regenwasserspeicher besteht in der Regel aus einem Einlass (inklusive eines Stützrohres, das die Entstehung von Turbulenzen innerhalb des Tanks und somit auch die Vermischung von suspendierten Schichten verhindert), einem Überlauf mit entsprechender Entlüftung und einem Auslass inklusive eines Rückflussverhinderers. Zur Ermöglichung der Innenanwendung (z. B. Toilettenspülung) wird in den Tank eine Pumpe eingebaut, die das Wasser zu den hochliegenden Zapfstellen leitet [8, S. 538f].

Die Tanks variieren bezüglich des Aufstellortes, Form, Größe und Baustoffen stark. Üblicherweise werden Kunststoff- oder Betonspeicher benutzt, die entweder ober- oder unterirdisch, innen oder außen eingebaut werden. Unabhängig von der Bauart sind immer die Anforderungen an Schall-, Frost- und Brandschutz zu beachten [41].

Ein wichtiger Aspekt im urbanen Raum sind der beschränkte Platzbedarf sowie die ästhetische Qualität der Umgebung. Eine bewährte Praxis ist eine entsprechende Minimierung der Regenwassernutzung, um eine geeignete Speichergröße für den Kellereinbau zu schaffen. Üblicherweise nutzt man hohe, längliche Zisternen, die nur wenig Aufstellplatz benötigen und bei Bedarf als Kombination von mehreren Speichern in der Reihe angeordnet sein können. Diese Methode bietet weitere Vorteile beim Einbau, da in der Regel kein Bodenaushub oder Beachtung des Grundwasserspiegels erforderlich sind. Der Betrieb und die Wartung sind durch eine leichte Zugänglichkeit deutlich erleichtert [8, S. 538f, 808f], [41]. Eine Synergie zwischen Gestaltung und Funktion des Regenwasserspeichers wurde durch MARS Architekten aus Shanghai in einem Pilotprojekt beim BMW Guggenheim Lab in Mumbai in Form einer Wasserbank (eng. „Water Bench“) umgesetzt.



Abbildung 14: Wasserbank - ein Prototyp entworfen durch MARS Architekten, [43]

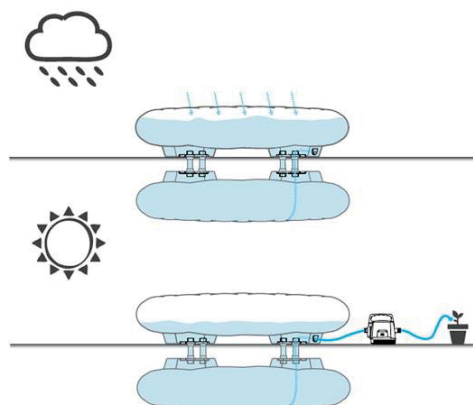


Abbildung 15: Schematische Funktionsweise der Wasserbank, [44]

Das Konzept nutzt den kontinuierlichen, schweren Niederschlagsanfall während der nassen Jahreszeit in tropischen und subtropischen Klimazonen zum Aufladen des internen Reservoirs der Bank. Dieses Wasser wird dann verwendet, um die umliegende Vegetation während der Trockenzeit zu bewässern. Das Design der Bank, das in der Abbildung 14 zu sehen ist, unterstützt das Ansammeln und Ansaugen des Wassers, indem die tiefliegenden Knöpfe als Wassereinlass in den Speicher wirken. Auf diese Weise bleibt die Oberfläche trocken zum Sitzen und bringt den Komfort eines städtischen Wohnraums. Die Bank ist aus teilweise recycelten Polyethylen gebaut und bietet eine mögliche Erweiterung der Speicherfähigkeit

durch den Einbau eines unterirdisch liegenden Zweitspeichers, wie auf Abbildung 15 dargestellt. Zurzeit gibt es Ausführungen in drei Speichermengen – 500, 1000 und 1800 l, die an mehreren öffentlichen Plätzen in Mumbai getestet werden.

### 3.2.4 EINSARPOTENTIALE

Genauso wie bei der Grauwassernutzung ergeben sich bei der Regenwassernutzung Einsparungen, die immer von dem Einsatzbereich abhängig sind. Bei der Verwendung des gesammelten Wassers zur Toilettenspülung, Bewässerung oder für die Waschmaschine werden vor allem Ersparnisse beim Trinkwasserverbrauch und bei der Abwasserentsorgung erreicht [8, S. 266] [30]. Im Einzelnen können hier etwa 50 % des täglichen Pro-Kopf-Verbrauchs eingespart werden [8, S. 537, 800, 806]. Die Studien in Australien (Coombes und Kuczera) weisen auf 10 – 58 % Wasserverbrauchsreduktion beim Einsatz des Regenwassers für WC-Spülung, Waschmaschinen und Bewässerung. In Schweden (Villarral und Dixon) sind die Einsparungen 30 % bei der gleichen Nutzung. In Brasilien wurde eine Wassereinsparung von 32 % durch Nutzung von Regenwasser bei der Autowäsche an Tankstellen erreicht [8, S. 808]. Mit einer Verbrauchsreduktion ist auch im Bereich Energie zu rechnen. Durch eine hohe Qualität aufgrund niedriger Härte ist für die Behandlung und Reinigung des Regenwassers lediglich ein geringer Energieverbrauch nötig [8, S. 787]. Da die Wasserquelle nah am Verbraucher liegt, werden die Transportkosten für das Betriebswasser im Vergleich zu Trinkwasser minimiert [8, S. 788].

Das System zur Regenwasserrückgewinnung stellt ein effizientes, dezentrales und selbstständiges System zur Wasserversorgung, das vor allem in Gebieten ohne Kommunalversorgung (z. B. städtische Slums) von Bedeutung sein kann. Aufgrund eines relativ einfachen Aufbaus des Systems können die Wartungs- und Reinigungsarbeiten, unter einer bestimmten Anleitung, durch den Nutzer selbst durchgeführt werden [8, S. 788].

Weiterhin ist die Regenwassernutzung ein wirksamer Weg zur qualitativen und quantitativen Kontrolle des Niederschlagsabflusses. Dank einer nachhaltigen und wassersensiblen Planung kann die Bewegung von Schadstoffen wirksam kontrolliert werden und dadurch eine Verschmutzung und Erosion der Boden- und Wasserressourcen verhindern. Auch das Volumen des Abflusses kann mithilfe der Ansammlung und des Speicherns von Dachabflüssen verringert werden [8, S. 792f, 806]. In einigen Fällen können die Anlagen das Abflusswasser für eine bestimmte Zeit zwischenspeichern, um kleinere bis mittlere Überschwemmungen (bis zu einem durchschnittlichen Wiederholungsintervall von etwa 2 Jahren) in städtischen Gebieten zu



vermeiden. In diesem Fall sind jedoch deutlich größere Tanks und eine entsprechende Planung der Außenanlagen im Sinne der im Kapitel 2.3 beschriebenen nachhaltigen Kanalisation erforderlich. Mehrere Studien haben gezeigt, dass diese Art des Entwurfes im Allgemeinen die Spitzenentladungen um 32% bis 65% reduzieren könnten [8, S. 807f].

### 3.2.5 DEFIZITE

Die größten Einschränkungen im Zusammenhang mit Regenwassernutzung sind die Klimawandel-Modelle, die Änderungen der Niederschlagsmuster verkünden. In Zukunft ist mit einer Abnahme der jährlichen Niederschlagsmengen, unregelmäßig verteilten Regenzeiten sowie mit intensiveren Niederschlagsereignissen und damit verbundenen regionalen Überschwemmungen zu rechnen. Dadurch werden die Regenwasserversorgungssysteme zukünftig an die klimatischen Veränderungen ständig angepasst werden müssen, um eine lebensfähige Alternative für die Fließgewässer oder das Grundwasser zu bleiben [8, S. 802f]. Diese ständigen Anpassungen sind möglicherweise mit zusätzlichen Wartungskosten verbunden, die bei unregelmäßiger Durchführung zu Effizienzabfall des Systems führen können. Sowohl eine Über- als auch Unterdimensionierung des Speichers hat negative Auswirkungen auf die Funktionsweise des Systems. Beim zu kleinen Speicher ist es nicht möglich, genug Wasser zur Versorgung während Trockenzeiten zu speichern, und bei einer zu großen Zisterne gibt es häufig Bedenken bezüglich der erhöhten Investitionskosten und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit des Systems. Weiterhin wird das Regenwasser in mehreren Ländern aufgrund fehlender konkreter Vorschriften und Standards für alternative Wasserquellen durch den gleichen Reinigungsprozess wie kommunales Abwasser geführt. Das ist mit einem übermäßig strengen Behandlungsaufwand für relativ wenig kontaminiertes Wasser verbunden, was oft die Betriebskosten deutlich erhöht und somit als ein Abschreckfaktor für eventuelle Investoren wirkt [8, S. 800f].

## 3.3 ANDERE ALTERNATIVE WASSERQUELLEN

### 3.3.1 GRUNDWASSER

Das Grundwasser ist ein wichtiger Bestandteil des hydrologischen Wasserkreislaufs und wird mit dem Sickerwasser aus Niederschlag, Strömen, Seen oder anderen Naturwasserkörpern aufgeladen. Die steigende Urbanisierung der Erde reduziert die Infiltrationsflächen durch den Einbau von Straßen, Gebäuden und anderer undurchlässiger Oberflächen (siehe Kapitel 2.3). In Verbindung mit dem Bevölkerungswachstum und deren Überkonsum werden die natürlichen

Grundwasserressourcen ausgebeutet. In letzter Zeit wurden nachhaltige Konzepte der Grundwasserneubildung vorgestellt (z. B. die Regenwasserbewirtschaftungsanlagen dienen als Grundwasserneubildungssysteme), die den hydrologischen Wasserzyklus beschleunigen, in dem das Grundwasser mit recycelten Wasser aufgeladen wird. In diesem Zusammenhang darf das Grundwasser als alternative Wasserquelle bezeichnet werden die eine zuverlässige Versorgung bietet [8, S. 115f].

### 3.3.2 KOMMUNALABWASSER

Im Zusammenhang dieser Arbeit wird unter dem Begriff „Kommunalabwasser“ das häusliche Schmutzwasser, welches fäkale Feststoffe, Urin und Toilettenpapier (Schwarz- und Gelbwasser) enthält, bezeichnet. Hier ist auch das Wasser aus der Küchenspüle gemeint, da es durch den hohen Anteil an Nahrungsresten und Fetten nicht als Grauwasser betrachtet werden darf [29, S. 13], [30]. Allgemein handelt es sich um stark verschmutztes Wasser, das die höchste Reinigungsleistung benötigt, um wiederverwendet zu werden. Das bedeutet, dass die Qualität des zurückgewonnenen Wassers hygienisch gesehen sicherer ist, als jede Grund- und Oberflächenwasser [8, S. 115]. Jedoch aufgrund der hohen Behandlungskosten, sowie der sozialen Ablehnung wird das Abwasser nur in Sonderfällen als direkte häusliche Wasserversorgung genutzt (z. B. während Dürren) [8, S. 301]. Das Wasser wird als eine verlässliche Quelle zur Grundwasserneubildung gesehen [8, S. 210, 496–497]. Dies spielt eine wichtige Rolle bei der Wiederverwendung des recycelten Wassers als Trinkwasser in städtischen Gebieten [8, S. 822]. Im Allgemeinen gibt es eine starke soziale Unterstützung für Wasserwiederverwendung für den Einsatz im Außenbereich und Toilettenspülung, aber nicht wenn es in Kontakt mit dem menschlichen Körper kommen soll [8, S. 298]. Durch die Lagerung des Wassers in den Grundwasserleitern wird es einer natürlichen Behandlung unterzogen, dadurch verbessert sich die Ästhetik und damit die öffentliche Akzeptanz der Wiederverwendung als Trinkwasser [8, S. 822–825, 829].

In der nachhaltigen Weltansicht wird das Kommunalabwasser aufgrund seiner hohen Konzentrationen an Nährstoffen (z. B. an Stickstoff und Phosphor, die als Dünger in der Landwirtschaft genutzt werden können) nicht mehr als Abfall, sondern als wertvolle Ressource gesehen [8, S. 393].

### 3.4 EINSATZBEREICHE DER ALTERNATIVEN WASSERQUELLEN

Der Einsatzbereich des recycelten Wassers (Grau- und Regenwasser) hängt immer von der Qualitätsanforderung der voraussichtlichen Nutzung und von der im Speicher erreichten Reinigungsstufe ab. Regenwasser ist in der Regel weniger kontaminiert als Grauwasser, benötigt somit lediglich eine minimale Vorbehandlung (z. B. Gravitationsfiltration oder „First-flush“-Umleitung), um in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden zu können. Die Anforderungen an die Qualität sind jeweils in den regionalen bzw. nationalen Vorschriften und Normen angegeben. Die strengsten Regelungen betreffen immer die Trinkwasserqualität (z. B. EG-Richtlinie 2006/7/EG und die Normen der Weltgesundheitsorganisation). Jedoch in den Gebäudebetrieben gibt es mehrere Einsatzbereiche, die keine hohe Wasserqualität erfordern. Diese umfassen:

- Im Inneren des Gebäudes:
  - Toiletten- und Urinal Spülung [8, S. 415]
  - Waschmaschine [8, S. 415]
  - Brandschutz [8, S. 266]
  - Heizungswasser[8, S. 415]
  - Klimaanlage (z. B. Kühlturme) [8, S. 121, 266]
- Im Außenbereich:
  - Bewässerung von Grünanlagen (z. B. öffentliche Parks, Erholungszentren, Sportplätze, Landschaftsgärten oder Friedhöfe) [8, S. 415], [8, S. 266]
  - Grundwasseraufladung bzw. Abgabe an Gewässern [8, S. 415]
  - Ästhetische Landschaftsbau z. B. Teiche oder Springbrunnen [8, S. 120f, 167]
- Im urbanen Raum:
  - Autowaschanlagen [8, S. 415]
  - Staubkontrolle [8, S. 266]
  - Wäscherei [8, S. 167]
  - Fensterwäsche [8, S. 167]
- Andere Zwecke:
  - Zugabewasser für Betonmischungen (solange die Anforderungen der DIN EN 1008 erfüllt sind) [45] sowie Wasserlagerung von Beton, Reinigung von Gießformen etc.) [46]
  - künstliche Beschneigung [8, S. 266]

## KÜNSTLICHE BESCHNEIUNG

Ein Konzept, das in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat, ist die Nutzung des behandelten Abwassers zur Herstellung von Schnee. Aufgrund eines geringeren Kontaktes des menschlichen Körpers mit Schnee, sind die Anforderungen an die Qualität des Recyclingwassers gering. Eine Verwendung im Außenraum ist von Umgebungstemperaturen abhängig und somit nur in bestimmten Jahreszeiten und Regionen anwendbar, bietet jedoch bei einer zentralen Anlage ein großes Einsparpotential (z. B. am Mount Buller Alpine Resort, das sich 200 km nordöstlich von Melbourne, Australien, befindet und wo seit dem Jahr 2000 eine Pilotstudie zur Herstellung vom Schnee aus behandeltem Wasser in Betrieb ist [8, S. 500]). Wie das Beispiel des Ski Dubai Snowparks in Saudi-Arabien zeigt, ist die Wiederverwendung des Wassers zur künstlichen Beschneigung jedoch nicht nur auf gemäßigte und kalte Klimazonen begrenzt [47]. Sowohl das behandelte Abwasser, Grauwasser, als auch das Regenwasser können im indoor Freizeitzentrum verwendet werden. Auf dem in der Arbeit betrachteten Grundstück lässt sich diese Anwendung aus Platzgründen und voraussichtlichen Energie und Wasserverbrauch nur bedingt integrieren. Aufgrund eines mäßigen Kühl- und Energiebedarfes stellt diese Anwendung keine effiziente und nachhaltige Lösung für den Standort dar und wird somit nicht weiterverfolgt.

In dieser Arbeit wird ein Fokus auf folgende Nutzungen gelegt:

## FASSADENBEGRÜNUNG UND LEBENDE BALKONE

Die Vorteile der Anbringung einer Fassadenbegrünung wurden bereits in dem Kapitel 2.3 beschrieben. Das Konzept bietet vor allem in den warmen Klimazonen bzw. in den Sommermonaten ein hohes Energieeinsparungspotenzial durch die Reduktion der Innenraumtemperatur im Gebäude. Beim Einsatz dieser Art von passiver Gebäudekühlung ist es möglich, bis zu einer Außentemperatur von 30 °C auf konventionell erzeugte Kälte zu verzichten, was im Gebäude des Institutes für Physik (Humboldt-Universität, Berlin) nachgewiesen wurde [48]. Das Konzept „lebende Balkone“ umfasst Pflanzkästen mit intensiver Begrünung (kleine Sträucher, Bäume etc.), die auf dem Balkon angeordnet sind und durch ihre Höhe eine natürliche Beschattung bieten. Beide Systeme charakterisieren sich jedoch durch einen hohen Wasserverbrauch, vor allem in den Trockenzeiten. Eine nachhaltige Lösung bietet die Nutzung des Brauchwasserüberschusses zur Bewässerung. Durch die Gestaltung mit einheimischen Pflanzenarten kann der Wasserverbrauch weitest möglich reduziert werden.

Die Begrünungselemente bieten einen großen gestalterischen Spielraum, was in den Beispielen aus der Abbildung 16 bis Abbildung 18 zu sehen ist.



**Abbildung 16: Hotel Golden Holiday in Nha Trang, lebende Balkone, [49]**



**Abbildung 17: Banco Catalana, Barcelona, Fassadenbegrünung, aufgenommen am 22.04.2013**



**Abbildung 18: Unidad Médica Cecimin, Bogota, lebende Fassade, aufgenommen am 06.12.2016**

## VERDUNSTKÜHLUNG

Eine der größten energetischen Herausforderungen in das Bauwesen stellt die Aufheizung des Gebäudes durch Absorption der solaren Einstrahlung. Um diesem Prozess entgegenzuwirken, werden in Gebäuden Klimaanlage eingebaut, die eine behagliche Raumtemperatur gewährleisten. Eine effiziente Lösung zur Reduzierung der Wärmebelastung im Innenraum ist die Verdunstung vom Wasser. Während dieses physikalischen Prozesses werden 680 kWh Wärmeenergie pro Kubikmeter vom Wasser bei einer Temperatur von 30 °C verbraucht. Dies bietet eine einzigartige Möglichkeit, die Wärme real abzuführen, da die während des Verdunstungsprozesses aufgenommene Energie erst dort wieder freigesetzt wird, wo das Wasser kondensiert, d. h. in der Regel in der Atmosphäre bei der Wolkenbildung [27, S. 54]. Das Konzept „Kühlen durch Verdunsten“ kann im urbanen Raum durch Gestaltungselemente wie Springbrunnen und künstliche Flüsse oder durch die indirekte Verdunstungskühlung durch Abluftbefeuchtung in dem Lüftungssystem (so genannte „adiabate



Abluftkühlung“) umgesetzt werden. Besonders attraktiv ist vor allem die indirekte Kühlung, da es die Luftfeuchtigkeit innerhalb eines Gebäudes nicht beeinflusst. Für die adiabate Kühlung kann Brauchwasser (voraussichtlich Regenwasser) verwendet werden.

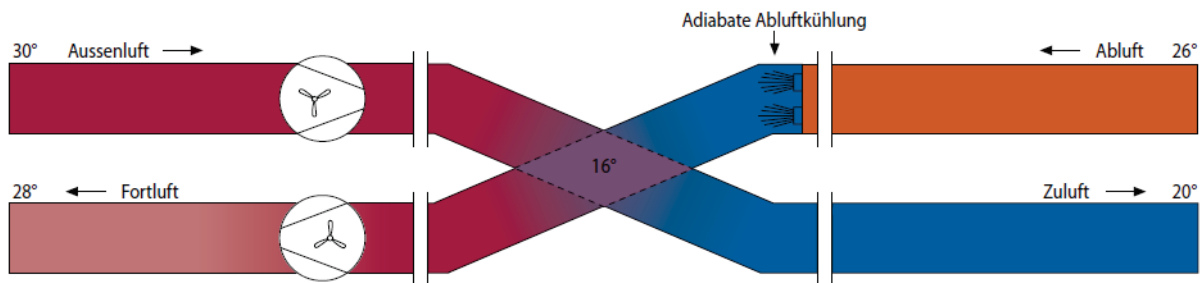


Abbildung 19: Das Prinzip der adiabaten Abluftkühlung in Klimaanlagen, [27, S. 55]

In der Abbildung 19 wird eine schematische Funktionsweise einer adiabaten Abluftbefeuchtung dargestellt. Die Grundlage zur Anwendung dieser Art der Kühlung ist eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, die im Wärmetauscher (z. B. Plattenwärmetauscher) die Abluft von der Zuluft trennt.

Diese Methode erlaubt bei Außentemperaturen von bis zu 30 °C die Zuluft auf 22 bis 20 °C zu kühlen, ohne auf technisch erzeugte Kälte zurückgreifen zu müssen. Bei einer Kombination mit Maßnahmen zur passiven Gebäudekühlung wie Fassaden- und Dachbegrünung, ist es möglich sogar vollständig auf konventionelle Kälteerzeugung zu verzichten [27, S. 55].



# 4 FALLBEISPIELE – GLOBALE PERSPEKTIVE

---

*Dieses Kapitel ist eine Falluntersuchung der Anwendung der Systeme aus dieser Arbeit. Hier werden die nachhaltige Systeme in theoretischen Beispielen unter Berücksichtigung der verschiedenen Weltregionen angewendet und beschrieben.*

## 4.1 GRUNDLAGEN DER PLANUNG

Im Folgenden wurde die Planung einer innovativen Wasserbewirtschaftung an vier verschiedenen Standorten: Melbourne–Australien, Berlin-Deutschland, Bangalore-Indien und Phoenix-USA angewendet, jeweils mit Betrachtung der örtlichen Aspekte, wie Klima, Ökologie, Ökonomie sowie die regionalen Normen und Benchmarks. Der Fokus liegt vor allem auf den in der Arbeit beschriebenen Low Impact Development Konzepten wie nachhaltige Regenwasserbewirtschaftung sowie Grau- und Regenwassernutzung. Für jede der oben genannten Regionen wird ein Konzept erarbeitet und eine entsprechende Nutzung für alternative Wasserressourcen vorgeschlagen. Zusätzlich werden jeweils die Versickerungsanlagen für die vorhandenen Niederschlagsmengen dimensioniert. Die Entwürfe werden abschließend auf ihre Effizienzpotentiale sowie eventuelle Defizite bewertet und im Vergleich mit aktuellen Verbrauchsanforderungen sowie Benchmarks für nachhaltiges Bauen gestellt. Das Ergebnis der Arbeit soll eine Basis zur nachhaltigen Entwicklung in den Regionen mit unterschiedlichen Schwachstellen im Bereich Wassereffizienz bilden.

### 4.1.1 KLIMATISCHE, HYDROLOGISCHE UND VERBRAUCHSDATEN

Eine entscheidende Voraussetzung zur effizienten und nachhaltigen Wasserbewirtschaftung ist die gründliche Analyse des Standortes. Im Fokus steht dabei eine Beschreibung der hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen in der entsprechenden Region. Nur auf diesem Weg können die lokalen Herausforderungen erkannt und mit regenerativen Methoden angesprochen werden. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Effizienz sollen die neu geplanten Anlagen auf vorhandenen Quellen und zentralisierten Lösungen basieren und diese so weit wie

möglich unterstützen. Die Informationen zur Wasserversorgung des jeweiligen Ortes basieren auf Angaben der regional aktiven Wasserversorgungsunternehmen:

- in Melbourne, Australien - Melbourne Water [50],
- in Berlin, Deutschland - Berliner Wasserbetriebe [51],
- in Bangalore, Indien - Bangalore Water Supply and Sewerage Board (BWSSB) [52],
- in Phoenix, Arizona, USA - City of Phoenix, Water Supply [53].

Ein Vergleich zwischen verschiedenen Wasserlieferanten ist in dieser Arbeit nicht durchgeführt worden.

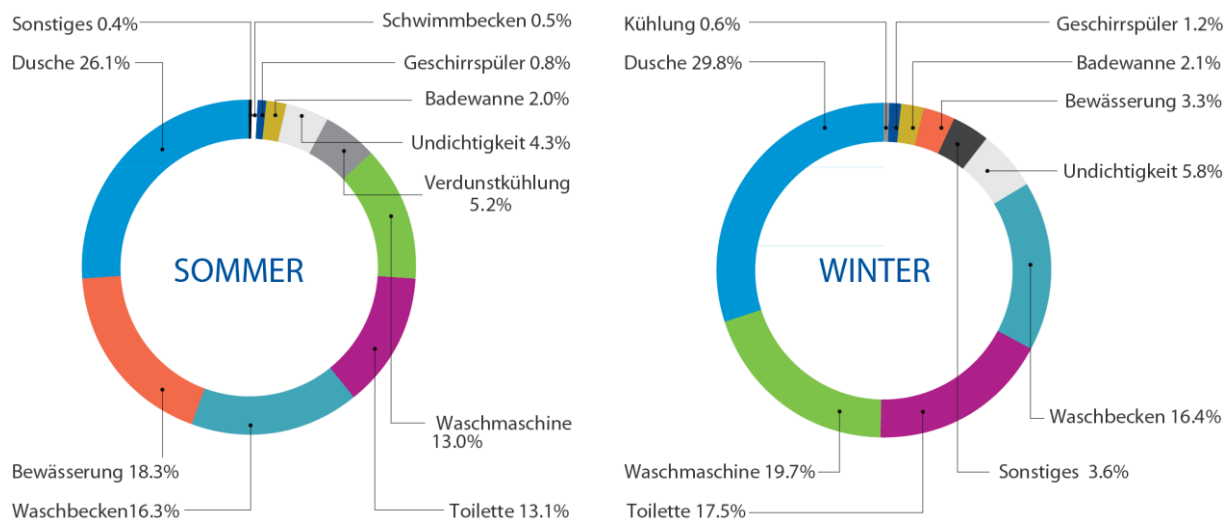
### AUSTRALIEN, MELBOURNE

Die Stadt Melbourne ist die zweitgrößte Stadt Australiens und befindet sich in einer gemäßigten, warmen und maritimen Klimazone mit reichen Niederschlägen das ganze Jahr über [54].

Die Grundlage der Wasserversorgung in Melbourne bilden zehn untereinander verbundene Speicherreservoirs. Eine Kombination zwischen mehreren Speichern bietet mehr Flexibilität bei der Versorgung. Das Grundwasser wird zurzeit im urbanen Raum nicht verwendet. Der Grund dafür ist eine große Kontaminierung der Grundwasserleiter. Vor allem im westlichen Melbourne sind aufgrund der in der Vergangenheit durchgeführten Einleitung von flüssigen Industrieabfällen und unterirdischen Erdöllager die Grundwasserressourcen ernsthaft verschmutzt. Zusätzlich charakterisieren sich die meisten Grundwasserleiter in Melbourne durch einen mittleren bis hohem Salzgehalt (genaue Angaben – siehe Anhang 1) [55, S. 434f]. Als Notmaßnahme zur Wasserversorgung in Trockenzeiten dient die Viktorianische Entsalzungsanlage [56].

Die Qualität des Trinkwassers in Melbourne wird ständig auf einen hohen Niveau gehalten, indem eine Reihe von Richtlinien bei der Bereitstellung betrachtet werden, z. B. Safe Drinking Water Regulations 2005 (Department of Health and Human Services) und Australian Drinking Water Guidelines 2011 (National Health and Medical Research Council) [57]. Die hohe Trinkwasserqualität wird durch einen aufwendigen Behandlungsprozess inklusive UV-Desinfektion, Chlorierung, pH-Korrektur und Fluoridierung des Wassers erreicht [58, S. 16]. Die genauen Reinigungsstufen sowie die Ergebnisse einer Laboruntersuchung sind im Anhang 2 zu finden.

In Melbourne werden für die Haushalts- und Gewerbenutzung täglich im Durchschnitt 166 l Wasser pro Person verbraucht [50]. Der Verbrauch ist aber stark von den Jahreszeiten abhängig. Im Sommer wird bis zu 20 % mehr Wasser (vor allem zur Bewässerungs- und Kühlungszwecken) als im Winter gebraucht. In Abbildung 20 ist ein gemittelter Wasserverbrauch (für Winter und Sommer) pro Person und Tag dargestellt.



**Abbildung 20: Durchschnittlicher Wasserverbrauch pro Person und Aktivität im Sommer und im Winter, Melbourne, Australien, [58, S. 16]**

Sowohl im Sommer als auch im Winter besteht die Möglichkeit bis zu 45 % des Wasserverbrauchs mit alternativem Wasser zu ersetzen. Der Bedarf fürs Brauchwasser kann nahezu vollständig mit anfallendem Grauwasser gedeckt werden. Im Sommer kommt 44,4 % und im Winter 48,3 % des Tagesverbrauchs aus Dusche, Badewanne und Waschbecken und eignet sich zur Wiederverwendung für Bewässerung, Toilettenspülung, Waschmaschine sowie Reinigung. Weiterhin entsteht in den Sommermonaten ein zusätzliches Einsparpotential von 5 % bei der Verwendung des Regenwassers zur Verdunstkühlung. Dank einer intelligenten Verbrauchsmessung können vorhandene Undichtigkeiten in den Leitungen identifiziert und beseitigt werden, was eine weitere Wassereinsparung von 5 % pro Jahr bringen kann.

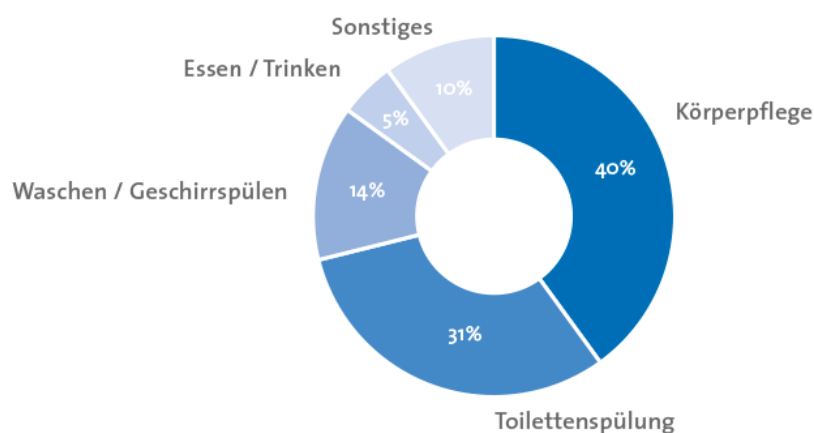
## DEUTSCHLAND, BERLIN

Die Hauptstadt Deutschlands liegt in einer gemäßigten Übergangszone zwischen einem maritimen und kontinentalen Klima. Durch den großen Anteil an Grünflächen gibt es eine deutliche Schwankung der Temperaturen innerhalb der Stadt, insbesondere in den Freiflächen außerhalb der dicht bebauten Zentren. Während der Sommermonate fällt im Durchschnitt die höchste Niederschlagsmenge und sorgt für Abkühlung. Ganzjährig gibt es pro Monat ca. neun

bis zehn Regentage, wobei Dezember mit durchschnittlichen zwölf Regentagen der regenreichste Monat ist. Die östliche Lage macht das Klima in Berlin anfällig für scharfe Ostwinde, die Kälteperioden verursachen können [59].

Das Berliner Trinkwasser, das durch die Berliner Wasserbetriebe zum Verbraucher geliefert wird, stammt aus innerstädtischen Grundwasservorkommen [51]. Diese sind in ausreichender Menge aufgrund der Neubildung aus regelmäßigen Niederschlägen und der Uferfiltration des Oberflächenwassers aus Flüssen und Seen vorhanden. Die Qualität des Grundwassers ist dank einer natürlichen Reinigung des Sickerwassers durch die Bodenschichten und einem strengen Schutz der Brunnumfelder stets hoch und benötigt lediglich eine geringe Behandlung, um die Anforderungen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) zu erfüllen [60]. Eine Zusammenstellung der genauen Werten und der rechtlichen Anforderungen sind in Anhang 3 zu finden.

Täglich werden in Berlin durchschnittlich 115 l pro Kopf Trinkwasser verbraucht [61]. In Abbildung 21 ist eine prozentuale Verteilung pro Aktivität in einem Berliner Haushalt dargestellt.



**Abbildung 21: Wasser im Haushalt, durchschnittlicher Verbrauch pro Aktivität, Berlin, Deutschland, [61]**

Aus der Zusammenstellung der Verbräuche ist abzuleiten, dass mehr als 40 % (Toilettenspülung 31 % + Sonstiges 10 %) des Tageswasserverbrauchs durch alternative Wasserquellen gedeckt werden könnte. Das Grauwasser steht mit 40 % des Tagesverbrauchs (Körperpflege) zur Verfügung. Als Ergänzung zur Grauwasseranlage sowie als Erweiterung der Brauchwasserverfügbarkeit für weitere Zwecke, wie z. B. Verdunstkühlung oder Bewässerung, kann das anfallende Regenwasser verwendet werden.

## INDIEN, BANGALORE

Bangalore ist der Hauptstadt der Region Karnataka sowie die drittgrößte und eine der am schnellsten wachsenden Städte in Indien [52].

Der Subkontinent Indien erlebt ein tropisches Monsunklima mit bedeutenden saisonalen Schwankungen bei den Niederschlägen. Etwa 80 % des gesamten Jahresniederschlags treten während des Monsunzeitraums auf. In Bangalore tritt der Südwest-Monsun im Zeitraum Juni-September auf. Die Temperaturen liegen das ganze Jahr über im Bereich zwischen 20-30 °C [62, S. 63], [63].

Die Wasserversorgung basiert grundsätzlich auf Oberflächenwasser, vor allem auf zwei Flüssen: Arkavathi (ca. 20% der Gesamtversorgung) und Cauvery (ca. 80% der Gesamtversorgung) [52]. Die Grundwasserreserven werden in Bangalore in großen Mengen zu landwirtschaftlichen Zwecken genutzt und somit deutlich ausgebeutet. Die natürliche Infiltration ist auf überwiegend lehmigem Boden mit geringer Durchlässigkeit deutlich verzögert [64]. Aufgrund eines raschen Bevölkerungszuwachses ist die kommunale Versorgung nicht in der Lage, für die gesamte Stadt eine hygienisch unbedenkliche Trinkwasserversorgung mit entsprechender Abwasserableitung zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird in den Randgebieten das Wasser voraussichtlich aus der Grundwasserreserven gewonnen. Da jedoch viele von den Brunnen sich im Privatbesitz befinden, ist eine genaue Einschätzung des Verbrauchs nicht machbar [65]. Nach Angaben der Bangalore Water Supply and Sewerage Board (BWSSB) wurden im Jahr 2017 weitere Sanierungs- sowie Modernisierungsmaßnahmen im Bereich Trinkwasserversorgung sowie Kommunalabwasser abgeschlossen (z. B. Modernisierung und Vergrößerung der Kläranlagen - T.K.Halli In lieu, Erhöhung der Trinkwasserversorgungsmengen durch die Umsetzung der Cauvery water supply scheme) [52]. Somit wird in der Arbeit von einer funktionsfähigen städtischen Kanalisation ausgegangen, an die das Planungsgebiet angeschlossen wird.

Laut Angaben von Central Public Health and Environmental Engineering Organisation wird in Bangalore täglich 135 l Wasser pro Person verbraucht [64]. Eine prozentuale Verteilung pro Aktivität ist in der Abbildung 22 dargestellt.

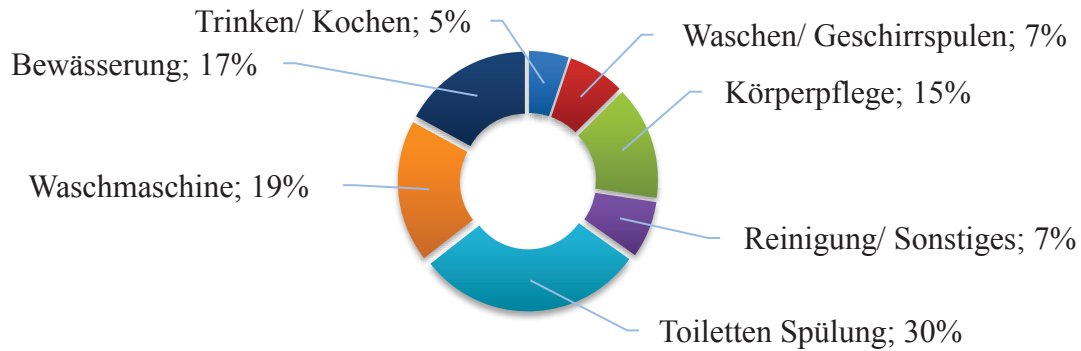


Abbildung 22: Wasserverbrauch in Liter pro Person in einer Haushalt in Bangalore, Indien, [64]

Bis zu 75 % des Wasserbedarfes kann in Indien durch alternative Wasserquellen wie Grau- oder Regenwasser ersetzt werden, dazwischen Wasser zur Toilettenspülung, Reinigung, Waschmaschine und Bewässerung. Lediglich 20 % des Brauchwasserverbrauches kann mit beim Körperpflege anfallenden Grauwasser abgedeckt werden. In diesem Fall ist ein System zur doppelten Nutzung des Wassers aus der Waschmaschine sinnvoll. Zuerst wird das Grauwasser aus der Dusche zum Wäsche waschen genutzt und danach kann das anfallende Abwasser z. B. zur Toilettenspülung verwendet werden.

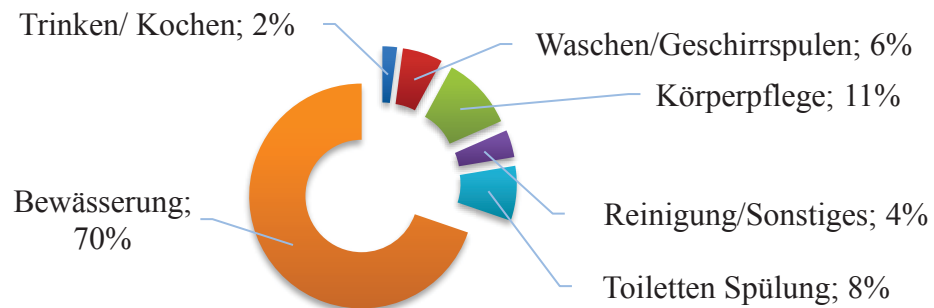
## USA, PHOENIX

Phoenix ist die Hauptstadt des US-Bundesstaats Arizona und wird durch ein Wüstenklima mit sehr hohen Temperaturen, die in Sommer über 30 °C steigen und quasi keinen Niederschlag geprägt [66].

Der größte Anteil des städtischen Trinkwassers kommt aus dem Salt River Project und dem Central Arizona Project, in dem das Wasser aus den Flüssen Salt, Verde und Colorado durch Rohrleitungen in die Stadt geleitet wird. Nur ein kleiner Anteil des städtischen Trinkwassers kommt aus den regionalen Grundwasserreserven [53]. Die Bereitstellung des Trinkwassers erfolgt in drei Stufen, wobei die höchste Behandlungsstufe Zugabe von Desinfektionsmitteln umfasst, um die bundes- und staatlichen Trinkwasserstandards (darunter die Anforderungen der U.S. Environmental Protection Agency) zu erfüllen [67]. Eine detaillierte Beschreibung des Behandlungsprozesses und Qualität des Trinkwassers kann aus dem Anhang 5 entnommen werden.



Phoenix charakterisiert sich durch einen besonders hohen Wasserverbrauch von 380 l (ca. 100 Gallone) pro Tag und Person [68]. In der Abbildung 23 wurde eine prozentuale Verteilung des Wasserverbrauchs pro Aktivität dargestellt.



**Abbildung 23: Wasserverbrauch in Liter pro Person in einer Haushalt in Phoenix, USA, [68], [69]**

Der hohe Wasserverbrauch im Außenraum ist nicht nur durch die klimatischen Bedingungen (Wüstenregion ohne ausreichende Niederschläge für natürliche Befeuchtung der Vegetation) sondern auch durch verschwenderischen Wasserumgang und nicht ortsangepasste Landschaftsgestaltung bedingt. Somit kann die größte Wassereinsparung durch Reduktion des Wasserverbrauchs zur Bewässerung erreicht werden. Diese kann zum Beispiel durch die Gestaltung der Grünanlagen mit einheimischen Pflanzen erreicht werden. Die wichtigste alternative Wasserquelle bietet das Grauwasser, da es das ganze Jahr über zur Verfügung steht. Der Grauwasseranfall von Körperpflegeaktivitäten beträgt lediglich 11 % (zuzüglich eventuelles Abwasser aus Reinigung bzw. Waschmaschine) des Gesamtverbrauches und soll für die Toilettenspülung und Bewässerung im Außenraum anteilig eingesetzt werden.

#### 4.1.2 SOZIALEN UND KULTURELLEN ASPEKTE

Auf dem dritten World Water Forum im Jahr 2003 wurde eindeutig beschlossen: "Aufgrund seiner fundamentalen Rolle im gesellschaftlichen Leben hat das Wasser eine starke kulturelle Dimension: Ohne Verständnis und Betrachtung der kulturellen Aspekte unserer Wasserprobleme kann keine nachhaltige Lösung gefunden werden." (eng: "Due to its fundamental role in society's life, water has a strong cultural dimension. Without understanding and considering the cultural aspects of our water problems, no sustainable solution can be found.") [70]. Die kulturellen und religiösen Unterschiede sind wichtige Entscheidungsfaktoren in der Art, wie das Wasser in verschiedenen Gesellschaften wahrgenommen, geschätzt und verwaltet wird [70]. Als Beispiel eines religiösen Einflusses auf den Umgang mit Wasser wird Indien genannt, wo der größte Teil der Gesellschaft Hindu ist (Statistiken der Census im Jahr

2011 [71]). Die Überzeugungen und Praktiken des Hinduismus sind direkt an viele öffentliche Verwendungen von Flüssen gebunden. Üblicherweise werden die innerstädtischen Flüsse durch eine Vielzahl von öffentlichen Nutzungen wie z. B. Waschen von Personen, Kleidungen und Tieren, allgemeiner Haushaltverbrauch, Angeln, Transport etc. beeinflusst. Diese Nutzungen sind oft wesentlich für den Lebensunterhalt und sollen in der nachhaltigen Entwicklung immer mitbetrachtet werden (z. B. in dem eine strenge Regelung für Qualitätskontrolle des Wassers in den Flüssen durchgeführt wird) [72, S. 31].

#### 4.1.3 VORSCHRIFTEN UND WASSERPOLITIK

Beim Erstellen eines Wasserbewirtschaftungskonzeptes ist es besonders wichtig, die lokalen Standards, Vorschriften und Regelungen zu beachten. Diese Dokumente umfassen vor allem Themen wie z. B. Qualitätssicherung, Regen- und Grauwasserwiederverwendung, Maßnahmen zur Wassereffizienz etc. In der Regel wird zwischen globalen und regionalen Vorschriften unterschieden. Die globalen Vorschriften regulieren die absoluten Mindestanforderungen, z. B. WHO-Vorschriften für Wasserqualität [8, S. 202]. Die lokalen Regelungen dagegen sind in Abhängigkeit von der ökonomischen, klimatischen und sozialen Situation der Region entsprechend angepasst. Weiterhin ist die Wassereffizienz durch verschiedene Förderungen, Stiftungen und Gütesiegel, wie z. B. Steuernachlässe für den Einbau von Systemen zur Wiederverwendung von Wasser in Arizona US [8, S. 778], unterstützt. Auch die Gebäudezertifikate, die in den letzten Jahren ein weltweit anerkannter Trend geworden sind, spielen hier eine wichtige Rolle. In den betrachteten Städten bzw. Länder sind beispielweise folgende Dokumente bzw. Standards zu beachten:

- Australien:
  - Wasserqualität z. B. Safe Drinking Water Act 2003, Anforderungen der Environment Protection Authority [50],
  - Reduktion des Verbrauches: Permanent water saving rules - Department of Environment, Land, Water and Planning [73], Drought Response Plan [50], Aktionsplan der Stadt Melbourne - „Target 155“ [50],
  - Allgemeine Regelungen der Regierung, wie z. B. bestimmte Zeitspannen in denen eine Bewässerung in der Privatgarten erlaubt ist [74].

- Deutschland:
  - Wasserqualität: z. B. Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001[36],
  - Reduktion des Verbrauchss: EU Water Framework Directive [8, S. 204],
  - Gewässerschutz: Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [75],
  - Abwasser: AVBWasserV [76],
  - Anlagen: DIN-Normen (z. B. DIN EN 806 – Trinkwasserinstallationen, DIN 19650 – Bewässerung, DIN 1989-1 - Regenwassernutzungsanlagen)
  - Grauwasser: VDMA 24651 [32],
  - Siedlungswasserbewirtschaftung: DWA-A 138 [28] etc.
- Indien:
  - Wasserqualität und Versorgung z. B. The Bangalore Water Supply And Sewerage Act, 1964 [52], Anforderungen der WHO,
  - Regulierung auf dem nationalen und regionalen Niveau eingeführt durch die Ministry of Water Resources River Development, wie die National Water Mission oder die National Water Policy 2012 [77].
- USA (Arizona):
  - Wasserqualität: z. B. Clean Water Act [78], Safe Drinking Water Act [79]
  - Reduktion des Verbrauches: System Water Plan (ARS §45-342) [80], National Water Mission [77],
  - Regelungen und Vorgaben der Environmental Protection Agency (EPA), die sich allgemein mit Umweltschutz und Wassereffizienz beschäftigen,
  - Ressourcenschonung: The Arizona Administrative Code (Title 12. Natural Resources, Chapter 15. Department of Water Resources) [79]

Eine genaue Zusammenstellung und Vergleich der Anforderungen wurden aufgrund des großen Umfangs bei den Grenzwerten im Bereich Trinkwasserqualität in den untersuchten Ländern nicht durchgeführt.

#### 4.1.4 ZUSAMMENFASSUNG

In den folgenden Tabellen wird ein Überblick über die wichtigsten Informationen, die für die Planung und Erstellung der Konzepte erforderlich sind, geschaffen.

Die Tabelle 3 und Tabelle 4 stellen eine Zusammenfassung der wichtigsten hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen in den gewählten Städten dar. Diese bilden eine ideale

Vergleichsbasis, da jedes Beispiel ein unterschiedliches Niederschlagsmuster, Hauptwasserversorgung und sozialen Hintergrund besitzt. Somit ist es möglich für jedes Fallbeispiel ein separates Konzept mit einem unterschiedlichen Fokus zu erarbeiten und zu bewerten.

In Tabelle 5 wurden die Angaben zum Wasserverbrauch zusammengefasst und dienen als Grundlage für die Dimensionierung und Planung einer Grauwasseranlage in bestimmten Gebäuden. Der voraussichtliche Wasserbedarf wurde unter Berücksichtigung aktueller wassersparender Armaturen und Geräte berechnet.

Als Ergebnis der Analyse wurden in Tabelle 6 mögliche Anwendungen in den bestimmten Regionen vorgeschlagen. Zum Beispiel erweist sich eine aktive Regenwasserrückgewinnung in Phoenix, wo im Jahr lediglich ca. 211 mm Niederschlag fällt, als wenig effizient, wobei das gleiche Konzept in Melbourne mit regelmäßig verteiltem Niederschlag von 666 mm im Jahr besonders sinnvoll erscheint. Obwohl für alle Fallbeispiele die Planung von entsprechenden Regenbewirtschaftungssystemen vorgesehen ist, werden auch hier unterschiedliche Vorgehensweisen angewendet. Zum Beispiel dienen in Bangalore die Systeme einer effizienteren Ableitung des Monsunregenwassers in einen dafür vorgesehenen Speicher, in Phoenix muss das Abflusswasser möglichst gleichmäßig verteilt werden, um die Infiltration in den Untergrund zu unterstützen.

Tabelle 3: Zusammenstellung der hydrogeologischen Grunddaten für die gewählten Regionen

		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Quelle für die städtische Wasserversorgung	Oberflächen- wasser (z.B. Flüsse, Seen)	✓	✗	✓	✗
	Grundwasser	✗	✓	✓	✓
Vorhandene Fließgewässern		Yarra [56]	Spree, Dahme, Havel [81]	Arkavathi, Cauvery [52]	Salt, Verde, Gila, Agua Fria [82]
Vorhandene Reservoirs und deren Strombecken		Thomson, Upper Yarra, Trago, Yen Yean, Maroondah, [56]	-	-	See Pleasant (Agua Fria) [82],
Geologie: Überwiegende Bodenart und der Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ [m/s]		Feinsand bzw. Schluffiger Sand [83]  $10^{-4} \dots 10^{-7}$	Sandiger Kies [84]  $10^{-3} \dots 10^{-4}$	Sandiger Schluff bzw. Schluff [64]  $10^{-5} \dots 10^{-7}$	Feinsand bzw. Schluffiger Sand [85]  $10^{-4} \dots 10^{-7}$

Tabelle 4: Übersicht der klimatischen Grundlagen für die gewählte Standorte, Quelle: [www.climate-data.org](http://www.climate-data.org) [54], [63], [66], [86]

	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Klimadiagramm				
Temperaturdiagramm				
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemäßigt, warme und maritime Klima;</li> <li>• Jahresdurchschnitt Temperatur: <b>14,8 °C</b>;</li> <li>• Summierte Jahresniederschlagsmenge: <b>666 mm</b>;</li> <li>• Niederschläge über dem ganzen Jahr;</li> <li>• Niederschlagsärmste Monat – <b>Februar Ø 44 mm</b>;</li> <li>• Niederschlagsreichste Monat – <b>Oktober Ø 71 mm</b>;</li> <li>• Monat mit der höchsten Durchschnittstemperatur - <b>Februar (20,3 °C)</b>;</li> <li>• Monat mit der niedrigsten Durchschnittstemperatur - <b>Juli (9,4 °C)</b>;</li> <li>• Niederschlagsmengenunterschied zwischen dem trockensten und dem niederschlagsreichsten Monat: <b>27 mm</b>;</li> <li>• Temperaturunterschied zw. Februar und Juli: <b>10,9 °C</b>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemäßigt, warme kontinentale Klima;</li> <li>• Jahresdurchschnitt Temperatur: <b>9,1 °C</b>;</li> <li>• Summierte Jahresniederschlagsmenge: <b>570 mm</b>;</li> <li>• Niederschläge über dem ganzen Jahr;</li> <li>• Niederschlagsärmste Monat – <b>Februar Ø 34 mm</b>;</li> <li>• Niederschlagsreichste Monat - <b>Juni Ø 70 mm</b>;</li> <li>• Monat mit der höchsten Durchschnittstemperatur - <b>Juli (18,6 °C)</b>;</li> <li>• Monat mit der niedrigsten Durchschnittstemperatur - <b>Januar (-0,9 °C)</b>;</li> <li>• Niederschlagsmengenunterschied zwischen dem trockensten und dem niederschlagsreichsten Monat: <b>36 mm</b>;</li> <li>• Temperaturunterschied zw. Januar und Juli: <b>19,5 °C</b>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tropische Klima;</li> <li>• Jahresdurchschnitt Temperatur: <b>23,6 °C</b>;</li> <li>• Summierte Jahresniederschlagsmenge: <b>831 mm</b>;</li> <li>• Niederschlagsärmste Monat – <b>Januar Ø 1 mm</b>;</li> <li>• Niederschlagsreichste Monat - <b>September Ø 182 mm</b>;</li> <li>• Monat mit der höchsten Durchschnittstemperatur - <b>April (27,1 °C)</b>;</li> <li>• Monat mit der niedrigsten Durchschnittstemperatur - <b>Dezember (20,7 °C)</b>;</li> <li>• Niederschlagsmengenunterschied zwischen dem trockensten Monat und dem niederschlagsreichsten Monat: <b>181 mm</b>;</li> <li>• Temperaturunterschied zw. April und Dezember: <b>6,4 °C</b>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Wüstenklima;</li> <li>• Jahresdurchschnitt Temperatur: <b>21,5 °C</b>;</li> <li>• Summierte Jahresniederschlagsmenge: <b>211 mm</b>;</li> <li>• Es gibt quasi keinen Niederschlag;</li> <li>• Niederschlagsärmste Monat – <b>Juni Ø 3 mm</b>;</li> <li>• Niederschlagsreichste Monat - <b>August Ø 28 mm</b>;</li> <li>• Monat mit der höchsten Durchschnittstemperatur - <b>Juli (32,7 °C)</b>;</li> <li>• Monat mit der niedrigsten Durchschnittstemperatur – <b>Januar (11,4 °C)</b>;</li> <li>• Niederschlagsmengenunterschied zwischen dem trockensten Monat und dem niederschlagsreichsten Monat: <b>25 mm</b>;</li> <li>• Temperaturunterschied zw. Juli und Januar: <b>21,3 °C</b>.</li> </ul>



Tabelle 5: Abschätzung des Bedarfes auf Grundlage der voraussichtlichen Ausstattung und aktuellen Verbrauchsmustern

Gemessene Verbrauchswerte	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Tatsächlicher Gesamtverbrauch	<b>166 l/Pers und Tag (Sommerfall)</b> Stand 05.2017 [50]	<b>115 l/Pers und Tag</b> Stand 2016 [61]	<b>135 l/ Pers und Tag</b> Stand 07.2011 [64]	<b>380 l/ Pers und Tag</b> Stand 04.2017 [68]
Verteilung des täglichen Wasserverbrauches für verschiedene Tätigkeiten in Liter pro Person und Tag	Annahme basiert auf der Abbildung 20, [58, S. 16]: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trinken/ Kochen: <b>6</b></li> <li>• Körperpflege: <b>70</b></li> <li>• Waschen/Geschirrspülen: <b>10</b></li> <li>• Toiletten Spülung: <b>22</b></li> <li>• Waschmaschine: <b>21</b></li> <li>• Kühlung: <b>8</b></li> <li>• Bewässerung: <b>18</b></li> <li>• Sonstiges: <b>11</b></li> </ul>	Annahme basiert auf Angaben der Berliner Wasserbetrieben - Abbildung 21 [61]: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trinken/ Kochen: <b>6</b></li> <li>• Körperpflege: <b>46</b></li> <li>• Waschen/Geschirrspülen: <b>16</b></li> <li>• Toiletten Spülung: <b>35</b></li> <li>• Reinigung/Sonstiges: <b>12</b></li> </ul>	Angaben der Central Public Health and Environmental Engineering Organisation [64]: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trinken/ Kochen: <b>7</b></li> <li>• Waschen/Geschirrspülen: <b>10</b></li> <li>• Körperpflege: <b>20</b></li> <li>• Reinigung/Sonstiges: <b>10</b></li> <li>• Toiletten Spülung: <b>40</b></li> <li>• Waschmaschine: <b>25</b></li> <li>• Bewässerung: <b>23</b></li> </ul>	Annahme basiert auf Angaben der Arizona Department of Water Resources [68], [69]: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trinken/ Kochen: <b>8</b></li> <li>• Körperpflege: <b>40</b></li> <li>• Toiletten Spülung: <b>30</b></li> <li>• Reinigung/Sonstiges: <b>15</b></li> <li>• Waschen/Geschirrspülen: <b>22</b></li> <li>• Bewässerung: <b>265</b></li> </ul>
<b>voraussichtlicher Verbrauch in Liter pro Person und Tag nach dem Einbau wassersparenden Armaturen und Geräten</b>				
Waschen/ Geschirrspülen	Annahme: effiziente Geschirrspüler (z. B. iQ500 speedMatic von Siemens) mit Verbrauch 6,5 l/Waschgang; Voraussichtlich: 0,5 Waschgang pro Person und Tag Insgesamt: <b>3,25 l/Person und Tag</b>			
Körperpflege (Dusche, Waschbecken)	70 l	46 l	20 l	40 l
Waschmaschine	Annahme: effiziente Waschmaschine mit Verbrauch 50 l/Waschgang; Voraussichtlich: 1 Waschgang pro Person 2 Mal pro Woche Insgesamt: ca. <b>15 l/Person und Tag</b>			
WC-Spülung	Annahme: effiziente WC (z. B. Omnia GreenGain von Villeroy & Boch) mit zwei Mengen Spülung: 3,5/2 l; Voraussichtlich: 2 x 2 l und 1 x 3,5 l Insgesamt: ca. <b>7,5 l/Person und Tag</b>			
Reinigung/ Bewässerung/ Sonstiges	29 l	12 l	33 l	280 l
<b>voraussichtlicher Verbrauch in Liter pro Person und Tag</b>				
Vorhandene Grauwassermenge (Dusche, Waschbecken)	<b>Ca. 66 l/Pers und Tag</b>	<b>Ca. 46 l/Pers und Tag</b>	<b>Ca. 20 l/Pers und Tag</b> <b>+ 15 l/Pers und Tag (Waschmaschine)</b>	<b>Ca. 40 l/Pers und Tag</b> <b>+ 15 l/Pers und Tag (Waschmaschine)</b>
Potential für Nutzung alternativen Wasserquellen (Innenraum – WC-Spülung und Waschmaschine)	<b>22,5 l/Pers und Tag</b>			
Potential für Nutzung alternativen Wasserquellen (Außenraum – Reinigung und Bewässerung)	<b>35 l/Pers und Tag</b>	<b>12 l/Pers und Tag</b>	<b>33 l/Pers und Tag</b>	<b>280 l/Pers und Tag</b>
Reiner Trinkwasserbedarf	<b>Ca. 80 l/Pers und Tag</b>	<b>Ca. 68 l/Pers und Tag</b>	<b>Ca. 37 l/Pers und Tag</b>	<b>Ca. 70 l/Pers und Tag</b>

Tabelle 6: Planungsgrundlage für die nachhaltigen Konzepte basierend auf der Standortanalyse

	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Geeignete SuDS-Systeme	Versickerungsbecken, Mulden, Rigolen, Flächenversickerung	Versickerungsbecken, Mulden, Rigolen, Flächenversickerung	Rigolen, Rohr-Rigolen, Mulden,	Rigolen, Mulden, Flächenversickerung
Grauwassernutzung	✓	✓	✓	✓
Regenwassernutzung (aktiv/passiv)	aktiv/passiv	aktiv/passiv	aktiv/passiv	passiv
Dach Begrünung (intensiv/ extensiv)	intensiv	intensiv	intensiv	extensiv
Fassaden Begrünung	✓	✓	✓	✓
Möglichkeiten der Innovationen und Sonderlösungen	Künstliche Beschneidung, Verdunstkühlung, Bewässerung der Bepflanzung mit Grauwasser, „Lebende Balkone“, Begrünung der Fassade	Verdunstkühlung, Bewässerung der Bepflanzung mit Grauwasser, „Lebende Balkone“, Begrünung der Fassade	Künstliche Beschneidung, Kühlung mittels Raumgestaltung Elemente (z. B. Springbrunnen, künstliche Fluss), Bewässerung der Bepflanzung mit Grauwasser, „Lebende Balkone“, Begrünung der Fassade	Künstliche Beschneidung, Bewässerung der Bepflanzung mit Grauwasser, „Lebende Balkone“, Begrünung der Fassade

## 4.2 BESCHREIBUNG DES AUSGANGSSYSTEMS

Um eine Vergleichs- und Bewertungsgrundlage zum innovativen Wassermanagement zu bauen, wurden die nachhaltigen Systeme zur Wasserbewirtschaftung auf denselben ausgewählten Teil des urbanen Raum in allen vier gewählten Städten angewendet. Als Grundlage dient ein ca. 6,7 ha großes Grundstück mit einer Mischnutzung aus Verkaufs-, Büro- und Wohnnutzung.

**Tabelle 7: Flächenverteilung der Außenanlagen**

	<b>Straßen</b>	<b>Fußgängerwege</b>	<b>Wasserflächen</b>	<b>Grünflächen</b>	<b>Außenanlagen gesamt</b>
Fläche [m <sup>2</sup> ]	10.000 m <sup>2</sup>	6.500 m <sup>2</sup>	Max. 1.500 m <sup>2</sup>	28.000 m <sup>2</sup>	<b><u>46.000 m<sup>2</sup></u></b>

**Tabelle 8: Flächenverteilung der Bebauung**

Gesamt bebaute Fläche: <u>21.000 m<sup>2</sup></u>							
Bebauung	BGF [m <sup>2</sup> ]	KF [m <sup>2</sup> ]	NGF [m <sup>2</sup> ]	VK [m <sup>2</sup> ]	Anzahl Geschosse	NF pro Geschoss [m <sup>2</sup> ]	NF gesamt [m <sup>2</sup> ]
Einkaufszentrum	5.500	500	5.000	1.500	3	3.500	10.500
<b>Nutzfläche gesamt</b>							<b>10.500 m<sup>2</sup></b>
Bürogebäude 1-4	2.700	550	2.150	425	4	1.725	6.900
<b>Büronutzung gesamt</b>							<b>27.600 m<sup>2</sup></b>
Wohnhaus 1	1.600	320	1.280	130	4	1.150	4.600
Wohnhaus 2	1.400	280	1.120	120	4	1.000	4.000
Wohnhaus 3	1.800	360	1.440	140	4	1.300	5.200
<b>Wohnfläche gesamt</b>							<b>13.800 m<sup>2</sup></b>
Legende:	BGF	Bruttogeschossfläche					
	KF	Konstruktionsfläche (Annahme: ca. 0,2*BGF, Einkaufszentrum – 0,1*BGF)					
	NGF	Nettogeschossfläche (BGF-KF)					
	VK	Verkehrsfläche (Annahme: Einkaufszentrum ca. 0,3*NGF, Büro – 0,2*NGF, Wohnen – ca. 0,1*NGF)					
	NF	Nutzfläche (NGF-VK)					

Das gewählte Beispiel (siehe Abbildung 24, Tabelle 7 und Tabelle 8) besteht aus:

- einem Wohnbereich mit drei Mehrfamilienhäusern, die insgesamt 13.800 m<sup>2</sup> Wohnfläche bieten,
- vier Bürogebäuden mit insgesamt ca. 27.600 m<sup>2</sup> Nutzfläche,
- einem Einkaufszentrum mit 10.500 m<sup>2</sup> Nutzfläche,
- Außenanlagen (Zufahrtstrassen und Wegen, Grünflächen, Wasserbecken und Park).

Zur Vereinfachung wurde eine unterirdische Verkehrsanbindung für den gesamten Raum geplant (siehe Abbildung 25).

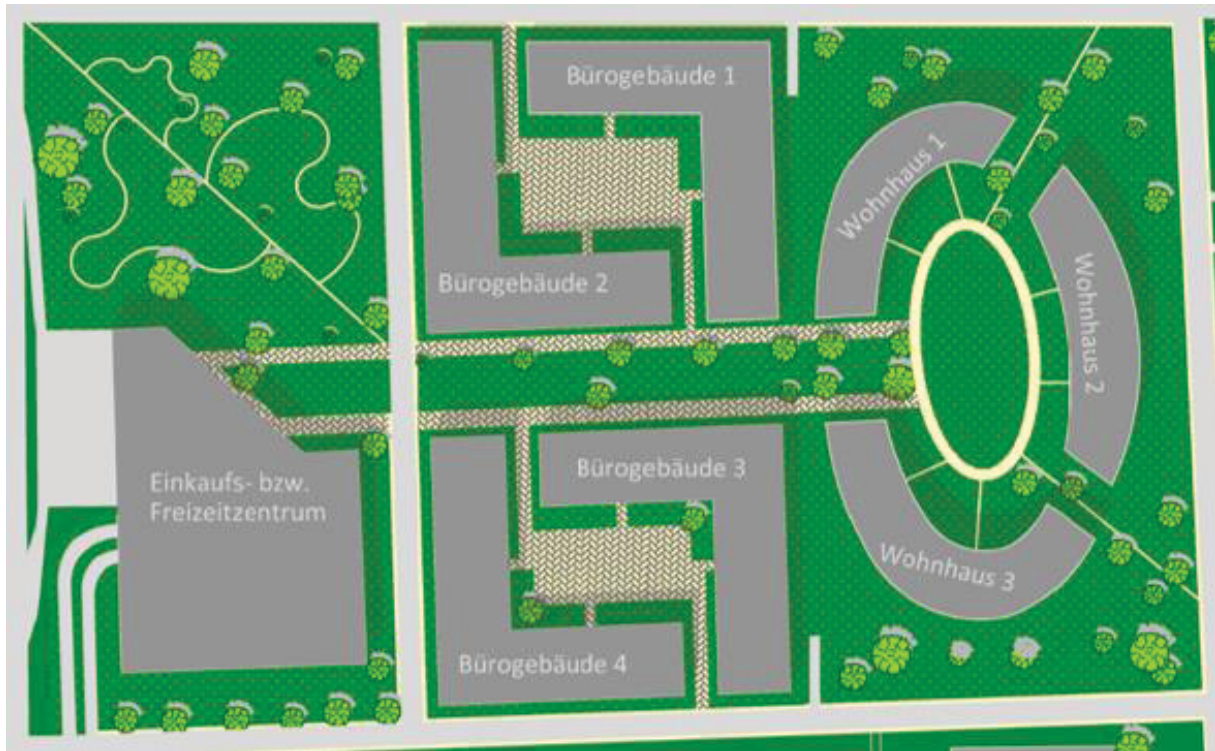


Abbildung 24: Masterplan – Ausgangsentwurf, o. M.

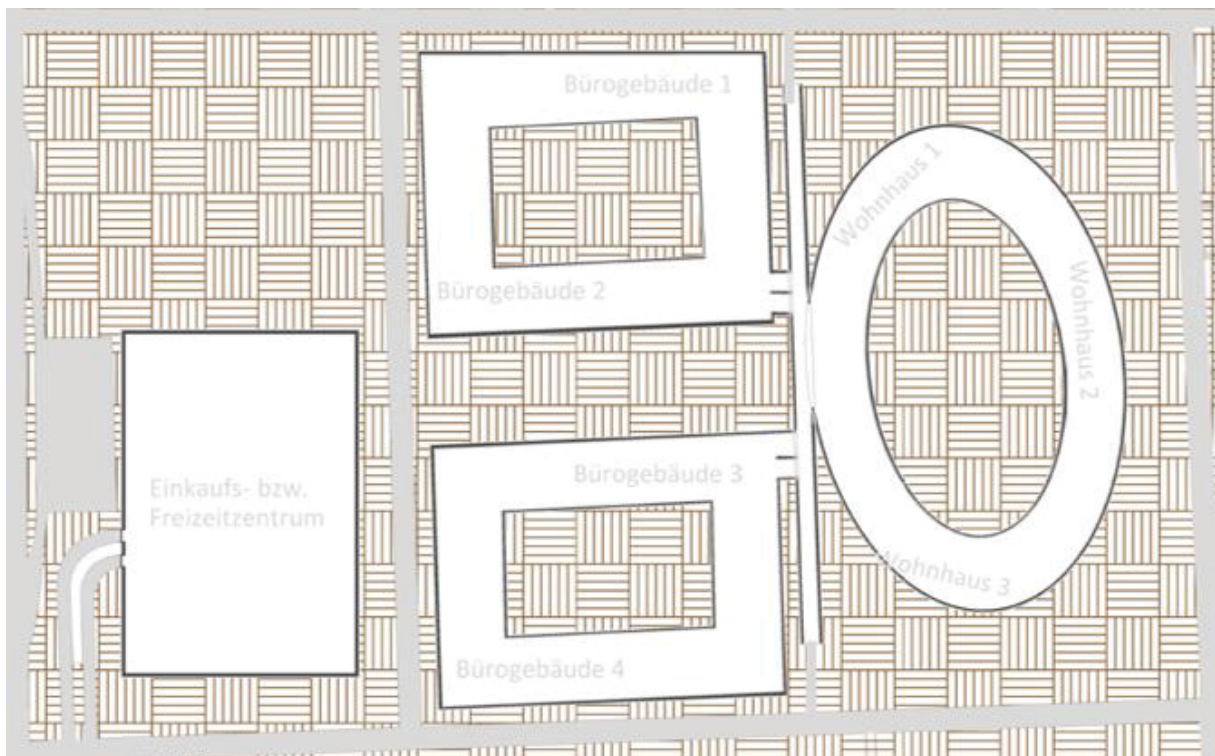


Abbildung 25: Masterplan – Ausgangsentwurf - Kellergeschoss, o. M.

Die Tiefgarage des Einkaufszentrums wird von der südlichen Straße erreicht. Aufgrund des erhöhten Verkehrs, der in diesem Bereich zu erwarten ist, wurden die Zufahrt und Ausfahrt als separate Wege geplant. Weiterhin verfügt das Gebäude über eine Lieferfläche (ca. 1.000 m<sup>2</sup>), die nah an der Landstraße liegt, was eine Versorgung des Gebäudes ohne LKW-Verkehr im Kommunenbereich ermöglicht. Die Zufahrt zum Büro- sowie Wohnbereich erfolgt durch einen unterirdischen Tunnel mit Einfahrt im Norden und Ausfahrt im Süden.

Auf dem Grundstück werden die in der Arbeit beschriebenen Siedlungswasserbewirtschaftungssysteme eingeplant (siehe Kapitel 2.3) sowie jeweils Systeme zur Nutzung von Wasser aus alternativen Quellen (mit dem Fokus auf Regen- und Grauwasser – siehe Kapitel 3). Das Ziel der Planung ist ein effizientes und nachhaltiges System zu schaffen, das weitest möglich regenerativ auf die natürlichen Wasserressourcen wirkt. Als Vereinfachung wird angenommen, dass das kommunale Abwasser zu einer zentralen Kläranlage abgeleitet, dort entsprechend gereinigt und wiederverwendet bzw. an das Grund- oder Oberflächenwasser abgegeben wird. Somit werden die natürlichen Wasserressourcen regeneriert und erneut im städtischen Wasserkreislauf verwendet.

### **4.3 PLANUNG DER GRAUWASSERNUTZUNG**

Der erste Schritt zum nachhaltigen und effizienten Wassermanagement ist eine möglichst genaue Abschätzung des zu erwartenden Bedarfes. Dieser wurde folgend auf Grundlage der regionalen Statistiken von städtischen Wasserwerken abgeschätzt.

Als Grundannahme gilt, dass die Gebäude mit wassersparenden Armaturen ausgestattet sind. Die Nutzungsintensität wird anhand der Standardangaben aus dem LEED-Zertifikat [87] angenommen. Der Bedarf umfasst lediglich den häuslichen Wasserbedarf, d. h. das Wasser für sanitäre Zwecke (WC-Spülung, Duschen), Küchenbedarf (Konsumzwecke sowie Küchenreinigung), sowie den eventuellen Wasserbedarf für Reinigung und Bewässerung von Grünanlagen.

Der Wasserbedarf für Waschmaschinen wird in den Wohnhäusern zentral pro Gebäude bestimmt (die Nutzungsintensität wird abgeschätzt), da jedes Gebäude voraussichtlich mit einem Waschkeller mit jeweils sechs wassersparenden Waschmaschinen ausgestattet wird.

Weitere Verbrauchsquellen, wie z. B. Brandschutz, Kühlung etc., werden zunächst in der Berechnung vernachlässigt. Der Einsatz des alternativen Wassers zu diesen Zwecken ist konzeptabhängig und wird bei Bedarf separat betrachtet.







Die Systeme zur Grauwassernutzung werden zentral pro Gebäude geplant. Aufgrund der sehr variablen Nutzung der Sanitäreanlagen und keine abschätzbare Verfügbarkeit des Grauwassers in dem Einkaufszentrum wurde die Nutzung dieser alternativen Wasserart nicht vorgesehen.

Um den Gesamtwasserbedarf je Gebäude zu bestimmen, muss die Nutzerzahl errechnet werden. Diese Zahl unterscheidet sich in jeder der betrachteten Regionen aufgrund von sozialen, kulturellen und gesellschaftlichen Faktoren (z. B. die große Population in Indien führt zu einer erhöhten Bevölkerungsdichte in den Städten). Die voraussichtliche Nutzeranzahl wird anhand der Verteilung der Nutzflächen (Tabelle 8) sowie nationaler Benchmarks für Wohn- und Arbeitsfläche pro Person bestimmt. Die Berechnung wurde in Tabelle 9 zusammengefasst.

**Tabelle 9: Berechnung der voraussichtlichen Nutzeranzahl pro Gebäude**

	<b>Melbourne, Australien</b>	<b>Berlin, Deutschland</b>	<b>Bangalore, Indien</b>	<b>Phoenix, USA</b>
Benchmark Büro: Arbeitsfläche/ Person	15 m <sup>2</sup> /Pers*			
Bürogebäude 1- 4	Jeweils 450 Mitarbeiter			
Benchmark Wohnhäuser: Wohnfläche/ Person	89 m <sup>2</sup> /Pers [90]	55 m <sup>2</sup> /Pers [90]	12 m <sup>2</sup> /Pers [91]	77 m <sup>2</sup> /Pers [90]
Wohnhaus 1	50 Pers	80 Pers	420 Pers	60 Pers
Wohnhaus 2	40 Pers	70 Pers	360 Pers	50 Pers
Wohnhaus 3	60 Pers	90 Pers	470 Pers	70 Pers
* Aufgrund fehlender landspezifischen Informationen wurden die Angaben aus der ASR-Richtlinie 1.2 angenommen				

Durch die Verbindung der Erkenntnisse aus Tabelle 5 und Tabelle 9 werden nun die Grauwassernutzungssysteme je Gebäude dimensioniert und in Tabelle 10 zusammengefasst. Die vollständige Berechnung ist in Anhang 6 dargestellt.

Tabelle 10: Dimensionierung des Grauwassersystems für den Wohnhaus 1-3 und den Bürogebäuden

		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
GW-Speicher für Waschmaschinen in m <sup>3</sup>	Bürogebäude	-			
	Wohnhaus 1	0,60	0,90	4,30	0,70
	Wohnhaus 2	0,50	0,80	3,70	0,60
	Wohnhaus 3	0,70	1,00	4,80	0,80
GW-Speicher für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	Bürogebäude	2,90			
	Wohnhaus 1	0,30	0,50	2,20	0,40
	Wohnhaus 2	0,20	0,40	1,90	0,30
	Wohnhaus 3	0,3	0,5	2,4	0,40
GW-Überschuss in m <sup>3</sup>	Bürogebäude	2,50			
	Wohnhaus 1	3,20	3,20	5,50	2,10
	Wohnhaus 2	2,50	2,90	4,80	1,70
	Wohnhaus 3	3,80	3,70	6,00	2,40

Tabelle 10 stellt eine erforderliche Größe des Grauwasserspeichers pro Gebäude dar. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen werden die Speicher für 75 % der Maximalauslastung dimensioniert. Die Wohnhäuser bieten täglich ausreichendes Grauwasser für die WC-Spülung und Waschmaschinenraum. Weitere Nutzungen für überschüssiges Grauwasser wie z. B. Bewässerung oder Reinigungszwecken werden nach dem Vergleich des Regenwassersverfügbarkeit bestimmt.

Weiterhin ist anzumerken, dass der Verbrauch im Bürobereich in der Regel lediglich auf Toiletten und Waschbeckennutzung begrenzt ist. Das Grauwasser aus den Waschbecken ist nicht ausreichend für den Bedarf der Toilettenspülung. Eine zusätzliche Brauchwasserquelle kann durch den Einbau eines Duschbereiches, z. B. in Verbindung mit Fahrradabstellplätzen, geschaffen werden. Diese Lösung wird im Sinne der Nachhaltigkeit positiv bewertet, da es ein ökologisches Transportmittel fördert. Pro Bürogebäude werden jeweils sechs Duschkabinen, drei für Frauen und drei für Männer, (Annahmen zur Nutzung: ein Mal pro Tag fünf Minuten Dusche) vorgesehen, die voraussichtlich von ca. 20 % der Gebäudenutzer täglich genutzt werden (Annahmen anhand Angaben der LEED-Nachhaltigkeitszertifikat) [87].

Die Berechnungswerte stellen lediglich eine theoretische Basis dar. In der Realität gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Grauwasserströmen, die bei ausführlichen und detaillierten Verbrauchsdaten in einer Computersimulation in die Berechnung mit einbezogen werden können.

#### **4.4 PLANUNG DER REGENWASSERNUTZUNG UND VERSICKERUNGSANLAGEN**

Das Regen- und Niederschlagswasser ist eine regionale Größe, die vor allem von der Klimazone abhängig ist. Die Verfügbarkeit dieser Ressource ist jedoch nicht gleichmäßig über die Zeit verteilt, somit werden die Systeme und Speicher entsprechend dem Bedarf und Verbrauch angepasst sein müssen. In den Fallbeispielen werden die Regenwasserzisternen mit dem Niederschlag aus den Dächern versorgt und sind allgemein für Bewässerungszwecke bzw. als Ergänzung für Grauwasseranlagen gedacht. In Abhängigkeit von der geplanten Sondernutzung, wie z. B. die gestalterischen Elemente im öffentlichen Bereichen, wird der Speicher entsprechend dimensioniert.

Die erforderlichen spezifischen Werte wie Regenspende ( $r_{D(n)}$ ) sowie Durchlässigkeit ( $k_f$ ) des Untergrundes wurden recherchiert, entsprechend umgerechnet und in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Umrechnungen der Regenstärken und Regenspenden basieren auf deutschen Verfahren und wurden mit Hilfe der Berechnungshinweise aus der Schneider - Bautabellen für Ingenieure [92, S. 13.74] bestimmt. Die Durchlässigkeit des Bodens wurde für die Berechnung als Mittelwert aus den in Tabelle 3 angegebenen Werten gebildet.

Die Planung der Regenwasserwiederverwendung erfolgt anhand der DIN 1989-1 [41] und der Versickerungsanlagen anhand des Arbeitsblattes DWA-A 138 [28].

Tabelle 11: Grundlagen der Planung von Versickerungsanlagen

Spezifische Werte	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Regenstärke $i$ in mm/min	0,038 Für $i_{72h(0,02)}$	-	1,45 Für $i_{15(1)}$	0,6 Für $i_{15(1)}$
Berechnung Regenspende [92, S. 13.74] $r_{D(n)} = i_{D(n)} \times 166,67$ $\left[ \frac{l}{s} * ha \right]$	$r_{72h(0,02)}$ = 6,33	$r_{15(1)}$ = <b>119,40</b>	$r_{15(1)}$ = <b>241,67</b>	$r_{15(1)}$ = <b>100,00</b>
Umrechnung Regenspende $r_{D(n)}$ in $r_{15(1)}$ durch Anwendung des Zeitbeiwerts $\varphi_{D(n)}$ $\left[ \frac{l}{s} * ha \right]$ [92, S. 13.74]	$r_{15(1)}$ = <b>290,36</b>	-	-	-
Quelle	[93]	KOSTRA- DWD 2010	[94, S. 141]	[95]
Gewählte Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ [m/s]	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$

#### 4.4.1 REGENWASSERVERSICKERUNGSKONZEPT - AUßENANLAGEN

Die Anlagen zur Versickerung von Niederschlagsabflüssen lassen sich nach mehreren Kriterien unterscheiden. Verschiedene Arten von Versickerungsanlagen wurden im Absatz 2.3 beschrieben. Diese sind zentral oder dezentral zu planen mit besonderer Berücksichtigung der maximalen Speicherfähigkeit, vorhandenen und erforderlichen Flächenbedarf sowie der hydraulischen Beschickung des Untergrundes. Die Planung der Versickerungsanlagen erfolgt immer auf Grundlage der Menge des Zuflusswassers, das aufgrund der Regenspende und der angeschlossenen undurchlässigen Flächen ( $A_u$ ) bestimmt wird. Die Summe  $A_u$  errechnet sich aus den Teilflächen und deren zugehörigen mittleren Abflussbeiwerten ( $\Psi_m$  – siehe Anhang 9), wie in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Berechnung der undurchlässigen Flächen ( $A_u$ )

Art der Oberfläche		$A_E$ [m <sup>2</sup> ]	$\Psi_m$ [-]	$A_u$ [m <sup>2</sup> ]
Park und Versorgungsgebiet	Rasenfläche, bepflanzte Fläche	11.500	0	0
	Laufwege (fester Kiesbelag)	1.000	0,6	600
	Laufwege (Pflaster mit offene Fugen)	1.600	0,5	800
	Straßen (Asphalt bzw. Fugenloser Beton)	3.200	0,9	2.880
	Ladebereich (Pflaster mit offene Fugen)	1.100	0,5	550
Mischgebiet	Rasenfläche, bepflanzte Fläche	4.800	0	0
	Laufwege (Pflaster mit offene Fugen)	2.000	0,6	1.200
	Straßen (Asphalt bzw. Fugenloser Beton)	1.600	0,9	1.440
	Innenhof (Rasengittersteine)	4.000	0,15	600
Wohngebiet	Rasenfläche, bepflanzte Fläche	11.000	0	0
	Laufwege (fester Kiesbelag)	500	0,6	300
	Laufwege (Pflaster mit offene Fugen)	1.000	0,6	600
	Straßen (Asphalt bzw. Fugenloser Beton)	2.700	0,9	2.230

#### 4.4.1.1 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN

Zur Vereinfachung und Vereinheitlichung der Planung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Als Vereinfachung wurde von einem homogenen und flachen Untergrund ausgegangen, das hydraulische Gefälle  $I_{hy}$  beträgt 1.
- Eine für die Berechnung maßgebende Regendauer ist zunächst unbekannt, deswegen ist es erforderlich, bei den Anlagen mit Zwischenspeicherung eine schrittweise Berechnung von ortsspezifischen Regenspenden durchzuführen. In den Bemessungsgleichungen ist die Regendauer und damit die Regenspende solange zu variieren, bis sich ein maximaler Wert für das erforderliche Speichervolumen ergibt [28, S. 42]. Als Vereinfachung wurde in der Arbeit die Berechnung lediglich auf eine jährliche Häufigkeit begrenzt ( $r_{D(1)}$ ).
- Der Zuschlagsfaktor  $f_z$ , der gemäß der DWA-A 117 zu wählen ist, wird für alle Bereiche als 1,2 (geringeres Risiko) angenommen.
- Die erste Abschätzung der erforderlichen Muldenfläche (*erf.  $A_s$* ) – Formel (2) wird durch die Multiplikation der undurchlässigen Flächen ( $A_u$ ) aus der Tabelle 12 mit dem Faktor 0,2



erreicht. Dieser Wert gilt für den schluffigen Untergrund und ist als Durchlässigkeitswert für alle Mulden angenommen.

- Für die Ermittlung erforderliche Rigolenlängen ist der Gesamtspeicherkoeffizient ( $s_{RR}$ ) der gewählten Rigole zu bestimmen. Als Vereinfachung wurde der Planungsbereich mit einheitlichen Rigolen mit einer Größe von 2,5 m x 2,5 m x 1 m (Breite x Länge x Höhe) geplant. Als Füllmaterial wurde Grobkies mit Korngröße von 8/32 und  $s_{RR} = 0,35$  gewählt.
- Dimensionierung des erforderlichen Speichervolumens der Versickerungsbecken wird mittels einfachem Verfahren (DWA-A 138, A3.1.1) bestimmt. Um eine angemessene Entleerungszeit nicht zu überschreiten, ist die Durchlässigkeit des Untergrundes im Beckenbereich von  $k_{f,Becken} \geq 10^{-5} \text{ m/s}$  (Fein- bis Mittelsand) erforderlich. In der Planung wurde ein Durchlässigkeitswert von  $k_{f,Becken} = 5 * 10^{-4} \text{ m/s}$  angenommen.
- Der Nachweis für das Speichervermögen der Versickerungsbecken erfolgt aufgrund von geometrischen Grundlagen und wird vereinfacht als ein Kegelstumpfvolumen berechnet (für die Berechnung wird der Teich auf eine Kreisfläche vereinfacht).
- Das Planungsgebiet wurde in drei Teilbereiche mit dezentralen Versickerungsanlagen geteilt: Park und Versorgungsbereich, Mischbereich und Wohnbereich, wie in Abbildung 27 dargestellt.

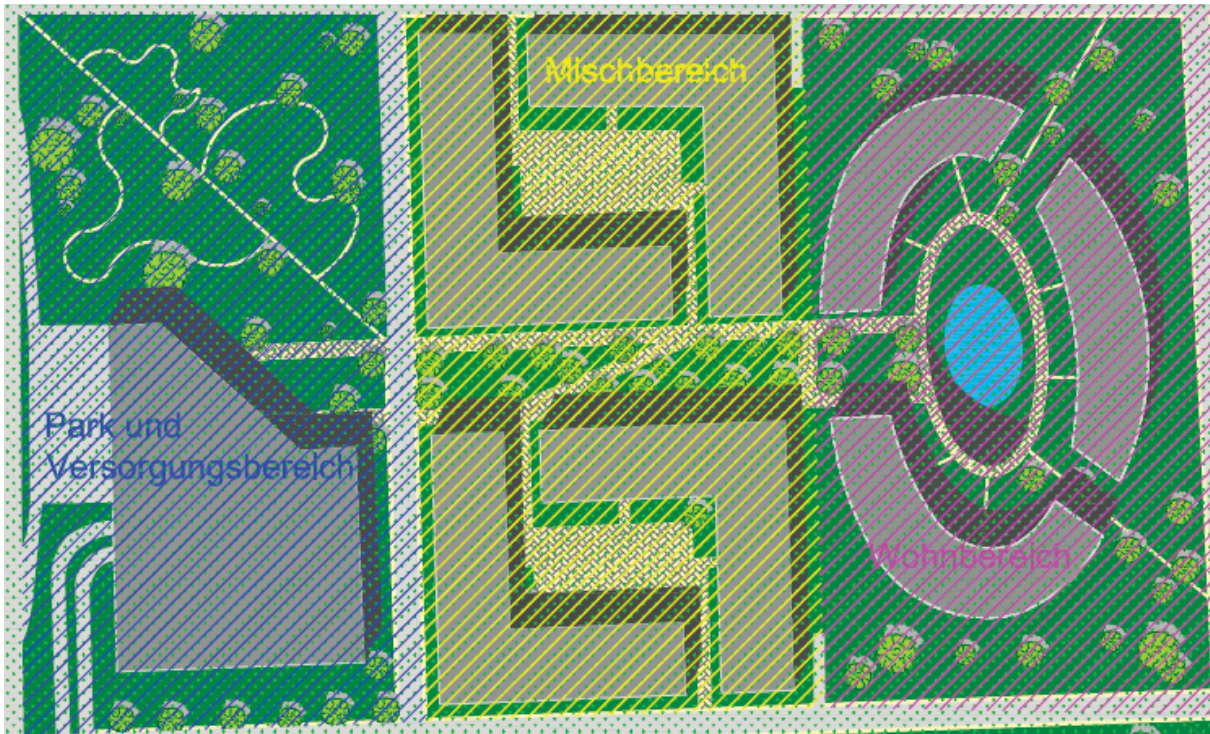


Abbildung 27: Bereiche für die dezentralen Versickerungsanlagen



Die Planung der Versickerungsanlagen erfolgt im Sinne eines SuDS-Systems (siehe Kapitel 2.3), d. h. den Vor-Entwicklungszustand des Standortes weitest möglich wiederherzustellen. Zuerst werden die Außenanlagen für die Flächenversickerung geplant, weil dies der natürlichen Versickerung am nächsten kommt. Für einen Nachweis der Flächenversickerung muss jedoch die Versickerungsfähigkeit des Bodens größer als der zu erwartende Regenabfluss sein. Die Überprüfung dieser Anforderung ist für die Beispielstädte in Tabelle 13 zusammengefasst.

**Tabelle 13: Nachweis der Flächenversickerungsfähigkeit**

Nachweis	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
$k_f \geq 2 * r_{D,n} * 10^{-7}$	$5 * 10^{-5}$ $\geq 5,8 * 10^{-5}$	$5 * 10^{-3}$ $\geq 2,4 * 10^{-5}$	$1 * 10^{-6}$ $\leq 4,8 * 10^{-5}$	$5 * 10^{-5}$ $\leq 2,0 * 10^{-5}$

Die Anforderung wurde in Berlin und Melbourne erfüllt, während in anderen Städten die Flächenversickerung als eigenständiges System ausgeschlossen ist. Die Tabelle 14 stellt die geplanten Konzepte für die jeweiligen Bereiche und Städte dar.

**Tabelle 14: Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung der Außenanlagen für jeweilige Bereiche und Städte**

Konzept der SuDS	Park und Versorgungsgebiet	Mischgebiet	Wohngebiet
<b>Melbourne, Australien</b>	Flächenversickerung	Muldenversickerung	Versickerungsbecken
<b>Berlin, Deutschland</b>	Flächenversickerung	Versickerungsbecken	
<b>Bangalore, Indien</b>	Rigolen -Muldensysteme		Versickerungsbecken
<b>Phoenix, USA</b>	Rigolen -Muldensysteme		

#### 4.4.1.2 MELBOURNE, AUSTRALIEN

##### *Park und Versorgungsgebiet*

Wie in Tabelle 13 nachgewiesen, erlaubt der sandige Untergrund in Melbourne eine ungehinderte Versickerung des Niederschlagswassers mittels Flächenversickerungsanlagen, wie z. B. Rasenflächen. Zu überprüfen ist jedoch, ob die vorhandenen Flächen ausreichend für das Versickern von anfallendem Niederschlag sind. Dazu sind die erforderlichen Versickerungsflächen ( $A_s$ ) für eine maßgebende Regenspende zu bestimmen. Diese errechnen

sich aus der Gleichung (1), die nach Umstellen eine Berechnungsformel für die erforderliche Versickerungsfläche ergibt.

$$(A_u + A_s) * r_{D,n} * 10^{-7} = A_s * \frac{k_f}{2} \rightarrow A_s = \frac{A_u}{\frac{k_f * 10^{-7}}{2 * r_{D,n}}} - 1 = 119.628 \text{ m}^2 \quad (1)$$

Die maßgebliche Regenspende wird bei 20 Minuten erreicht. Die erforderliche Versickerungsfläche ergibt somit für den Park und Versorgungsbereich 119.628 m<sup>2</sup>. Die vorhandenen Grünflächen betragen für das Gebiet lediglich ca. 11.000 m<sup>2</sup> (siehe Tabelle 12) somit ist die Flächenversickerung als eigenständiges System nicht ausreichend und wird mit seitlich angeordneten Mulden ergänzt.

Zuerst wird die erforderliche Versickerungsfläche (*erf. A<sub>s</sub>*) der Mulde in der Gleichung (2) als ersten Anhaltswert angeben.

$$\text{erf. } A_s = 0,2 * A_u = 0,2 * 4830 = 966 \text{ m}^2 \quad (2)$$

Die maßgebliche Regenspende wird bei 30 Minuten erreicht, dafür wird der erforderliche Volumenspeicher mit der Formel (3) berechnet und die Mulde dimensioniert.

$$V_M = \left[ (A_u + A_s) * 10^{-7} * r_{D,n} - A_s * \frac{k_f}{2} \right] * D * 60 * f_z = 171,54 \text{ m}^3 \quad (3)$$

Die Versickerungsmulden werden so bemessen, dass sie nur kurzzeitig unter Einstau stehen. Somit ist bei der Planung die Einstauhöhe (*z<sub>M</sub>*) auf 30 cm zu begrenzen:

$$z_M = V_M / A_s; z_M \leq 0,3 \text{ m} \quad (4)$$

Aus der Formel (5) ergibt sich die folgende Ungleichung für eine entsprechende Muldenfläche:

$$V_M / A_s \leq 0,3 \text{ m} \rightarrow A_s \geq V_M / 0,3 \rightarrow A_s \geq 572 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Die erforderliche Versickerungsfläche wird mit drei Mulden, die insgesamt 650 m<sup>2</sup> bieten geplant (siehe Abbildung 28). Für eine maximale Einstauhöhe (30 cm) wird der Nachweis der Entleerungszeit, die unter 24 h liegen soll, mit der Formel (6) durchgeführt.

$$\text{vorh. } t_E = 2 * z_M / k_f = 2 * V_M / A_s / k_f * 3600 = 2,93 \text{ h} \leq 24 \text{ h} \quad (6)$$

### Mischgebiet

In dem Mischgebiet ist die Versickerung mittels mittig liegender Mulden vorgesehen.

Die erforderliche Versickerungsfläche (*erf. A<sub>s</sub>*) der Mulde wird nach Formel (2) berechnet und beträgt:

$$\text{erf. } A_s = 0,2 * A_u = 0,2 * 3240 = 648 \text{ m}^2$$

Die maßgebliche Regenspende wird bei 30 Minuten erreicht, dafür wird der erforderliche Volumenspeicher mit der Formel (3) berechnet und die Mulde dimensioniert.

$$V_M = \left[ (A_u + A_s) * 10^{-7} * r_{D,n} - A_s * \frac{k_f}{2} \right] * D * 60 * f_z = \mathbf{115,07 m^3}$$

Mit Hilfe der Formel (5) wird die erforderliche Muldenfläche bestimmt:

$$V_M/A_s \leq 0,3m \rightarrow A_s \geq V_M/0,3 \rightarrow A_s \geq \mathbf{384 m^2}$$

Die Versickerung erfolgt mittels zwei Mulden von je 200 m<sup>2</sup> (siehe Abbildung 28). Die Laufwege sind so zu planen, dass das Regenwasser seitlich abfließen kann (leicht gerundeter Querschnitt). Für eine maximale Einstauhöhe wird der Nachweis der Entleerungszeit mit Formel (6) durchgeführt.

$$vorh. t_E = 2 * z_M/k_f = 2 * V_M/A_s/k_f * 3600 = \mathbf{3,2h \leq 24h}$$

#### *Wohngebiet*

Aus gestalterischen Gründen wird in der Mitte des Wohnbereiches ein Teich, der als Erholungsbereich benutzt werden soll, geplant. Das vorhandene Wasserbecken darf eine Zusatzfunktion bei der Regenwasserversickerung bekommen, in dem es als Versickerungsbecken geplant wird. Dieser kann dank einer hohen hydraulischen Belastung (das Verhältnis der angeschlossenen befestigten Fläche zur versickerungswirksamen Fläche ( $A_s$ ) größer als 15:1) auch größere Einstauhöhen (über 1 Meter) aufhalten. Für die Berechnung der Versickerungsrate  $Q_s$  müssen zunächst die Beckenabmessungen geschätzt werden. Diese sind als geplante minimale Beckengröße angegeben. Als Vereinfachung wird für die Versickerungsrate die Formel (7) angenommen:

$$Q_s = A_s * k_{f,Becken} \quad (7)$$

Das erforderliche Speichervolumen errechnet sich mit der Formel (8) und erreicht für die maßgebliche Regenspende von 20 Minuten:

$$V_B = [A_u * 10^{-3} * r_{D,n} - Q_s] * D * 60 * f_z = \mathbf{792,28 m^3} \quad (8)$$

Das vorhandene Wasserbecken ist mit 500 m<sup>2</sup> Fläche geplant, das ergibt einen Radius von:

$$\pi * r^2 = 500 m^2 \rightarrow r_1 = 12,6 m$$

Es wird von einem Maximalspeichervermögen bei einer Vergrößerung des Bestandsradius um 5 m (Abstand zur Straße,  $r_2 = 17,6 m$ ) und Begrenzung der Tiefe des Beckens auf max.  $z = 1,2 m$  in Vollfüllungszustand. Somit ergibt sich das maximale Speichervolumen mit der Formel (9):

$$V_{B,max} = \frac{\pi}{3} * z * [r_1^2 + r_1 * r_2 + r_2^2] \quad (9)$$

$$V_{B,max} = \frac{\pi}{3} * 1,2m * [12,6^2 + 12,6 * 17,6 + 17,6^2] = \mathbf{867 m^3}$$

Das maximale Speichervermögen des geplanten Teiches ist größer als das erforderliche Volumen, somit eignet es sich zur Nutzung als Versickerungsbecken. Die Laufwege und Straßen sind so zu planen, dass das Regenwasser seitlich abfließen kann (leicht gerundeter Querschnitt). Zusätzlich sind kleine Rinnen zu planen, die eine Durchquerung von fließendem Niederschlag durch die Laufwege ermöglichen. Das Geländegefälle soll immer leicht in Richtung Versickerungsbecken verlaufen (siehe Abbildung 28).

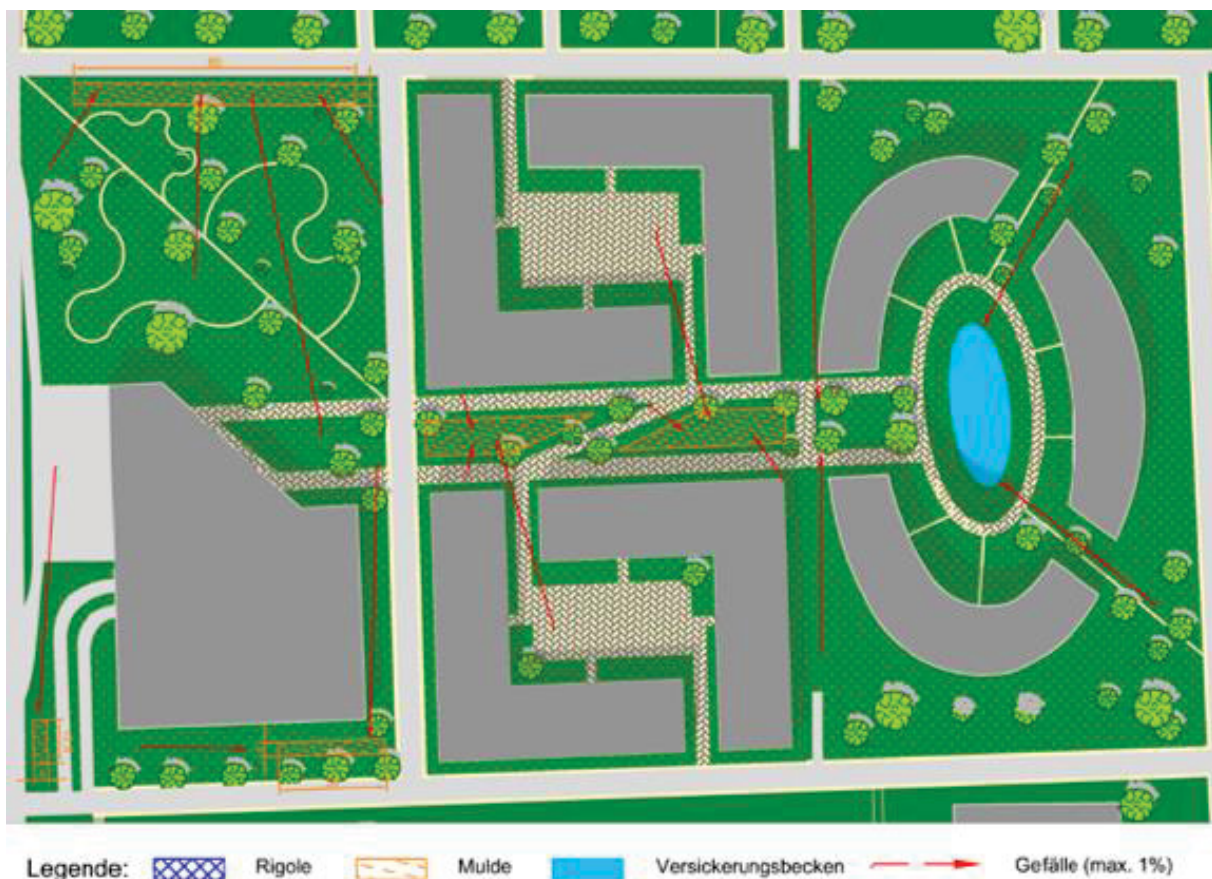


Abbildung 28: Versickerungskonzept – Melbourne, Australien

#### 4.4.1.3 BERLIN, DEUTSCHLAND

##### *Park und Versorgungsgebiet*

Aufgrund der Erfüllung der Minderanforderung aus Tabelle 13, wird die Versickerung in Berlin mittels Flächenversickerungsanlagen, wie z. B. Rasenflächen geplant. Folgend wird überprüft, ob die vorhandenen Flächen für das Versickern des anfallenden Niederschlags ausreichend sind. Dazu sind die erforderlichen Versickerungsflächen ( $A_s$ ) für eine maßgebende

Regenspende zu bestimmen. Diese errechnen sich aus der Gleichung (1), die nach der Umstellung eine Berechnungsformel für die erforderliche Versickerungsfläche ergibt.

$$A_s = \frac{A_u}{\frac{k_f * 10^{-7}}{2 * r_{D,n}}} - 1 = 39,87 \text{ m}^2$$

Die maßgebliche Regenspende wird bei 5 Minuten erreicht, dafür wird die erforderliche Versickerungsfläche bestimmt und ergibt für den Park und Versorgungsbereich 39,87 m<sup>2</sup>. Die vorhandenen Grünflächen betragen für das Gebiet insgesamt mehr als 11.000 m<sup>2</sup> (siehe Tabelle 12). Zu beachten ist jedoch die Herstellung einer entsprechenden Abflussneigung um Wassereinstau auf den Straßen und Laufwegen zu vermeiden.

#### *Misch- und Wohngebiet*

Die Versickerung wird in den Bereichen des Misch- und Wohngebietes zusammen in den vorhandenen Kleinteich erfolgen, der sich als Gestaltungselement sich als eine Versickerungsanlage anbietet. Das erforderliche Speichervolumen errechnet sich mit der Formel (8) und erreicht für die maßgebliche Regenspende von 15 Minuten:

$$V_B = [A_u * 10^{-3} * r_{D,n} - Q_s] * D * 60 * f_z = 577,21 \text{ m}^3$$

Das vorhandene Wasserbecken ist mit 500 m<sup>2</sup> Fläche und einem Radius von  $r_1 = 12,6 \text{ m}$  geplant. Das Maximalspeichervermögen wird durch Vergrößerung des Bestandsradius um 5 m (Abstand zur Straße,  $r_2 = 17,6 \text{ m}$ ) und Begrenzung der Tiefe des Beckens auf max.  $z = 1,2 \text{ m}$  im Vollfüllungszustand berechnet. Somit ergibt sich das maximale Speichervolumen mit der Formel (9):

$$V_{B,max} = \frac{\pi}{3} * 1,2 \text{ m} * [12,6^2 + 12,6 * 17,6 + 17,6^2] = 867 \text{ m}^3$$

Auch in diesem Fall ist das maximale Speichervermögen des geplanten Beckens größer als das erforderliche Volumen und dadurch die Funktion als Versickerungsbecken gewährleistet (siehe Abbildung 29).





Abbildung 29: Versickerungskonzept – Berlin, Deutschland

#### 4.4.1.4 BANGALORE, INDIEN

##### *Park, Versorgungs- und Mischgebiet*

Analog zu dem Versickerungskonzept in Melbourne (Kapitel 4.4.1.2), auch in Bangalore wird im Park, Versorgungs- und Mischbereich der Niederschlag in mittig liegenden Mulden gesammelt. Diese sollen jedoch zusammen verknüpft werden und als Kanal mit dem Versickerungsteich verbunden werden. Damit wird eine Sicherung für die Starkregen in der Monsunzeit vorgesehen. Die erforderliche Versickerungsfläche ( $erf. A_s$ ) der Mulde errechnet sich mit der Formel (2) und beträgt:

$$erf. A_s = 0,2 * A_u = 0,2 * 8070 = 1.614 \text{ m}^2$$

Die maßgebliche Regenspende für Berechnung der erforderlichen Volumenspeicher wird bei 240 Minuten erreicht und beträgt:

$$V_M = \left[ (A_u + A_s) * 10^{-7} * r_{D,n} - A_s * \frac{k_f}{2} \right] * D * 60 * f_z = 375,85 \text{ m}^3$$

Durch die Begrenzung der maximalen Einstauhöhe ergibt sich nach der Formel (5) eine entsprechende Muldenfläche von:

$$V_M / A_s \leq 0,3 \text{ m} \rightarrow A_s \geq V_M / 0,3 \rightarrow A_s \geq 1.252,83 \text{ m}^2$$



Da die Mulde als ein Sammelkanal dienen soll, ist hier die Berechnung der Entleerungszeit nicht erforderlich.

### *Wohngebiet*

Die Versickerung wird im Bereich des Wohngebietes in den vorhandenen Kleinteich erfolgen. Zu beachten ist jedoch in diesem Fall, die weitere Funktion des Teiches als Lagerung für das Recyclingwasser, die im Kapitel 4.5 genauer beschrieben wird. Das erforderliche Speichervolumen für Versickerung des Niederschlagswassers errechnet sich mit der Formel (8) und erreicht für die maßgebliche Regenspende von 15 Minuten:

$$V_B = [A_u * 10^{-3} * r_{D,n} - Q_s] * D * 60 * f_z = \mathbf{599,14 m^3}$$

Das Vorhandene Wasserbecken ist mit  $500 m^2$  Fläche und einem Radius von  $r_1 = 12,6 m$  geplant. Das Maximalspeichervermögen wird durch Vergrößerung der Bestandsradius um 5 m (Abstand zur Straße,  $r_2 = 17,6 m$ ) und Begrenzung der Tiefe des Beckens auf max.  $z = 2 m$  in Vollfüllungszustand bestimmt. Somit ergibt sich das maximale Speichervolumen mit der Formel (9):

$$V_{B,max} = \frac{\pi}{3} * 2 m * [12,6^2 + 12,6 * 17,6 + 17,6^2] = \mathbf{1.445 m^3}$$

Die maximalen Speichervermögen der geplanten Becken sind mit Absicht viel größer, als erforderliche Volumen geplant. Somit wird in dem Teich auch den Niederschlag in der Monsunzeit, in dem 80% des Gesamtjahresniederschlags abfällt, zwischengespeichert – siehe Absatz 4.1.1. In der Abbildung 30 wurden die Versickerungsanlagen des Grundstücks dargestellt.

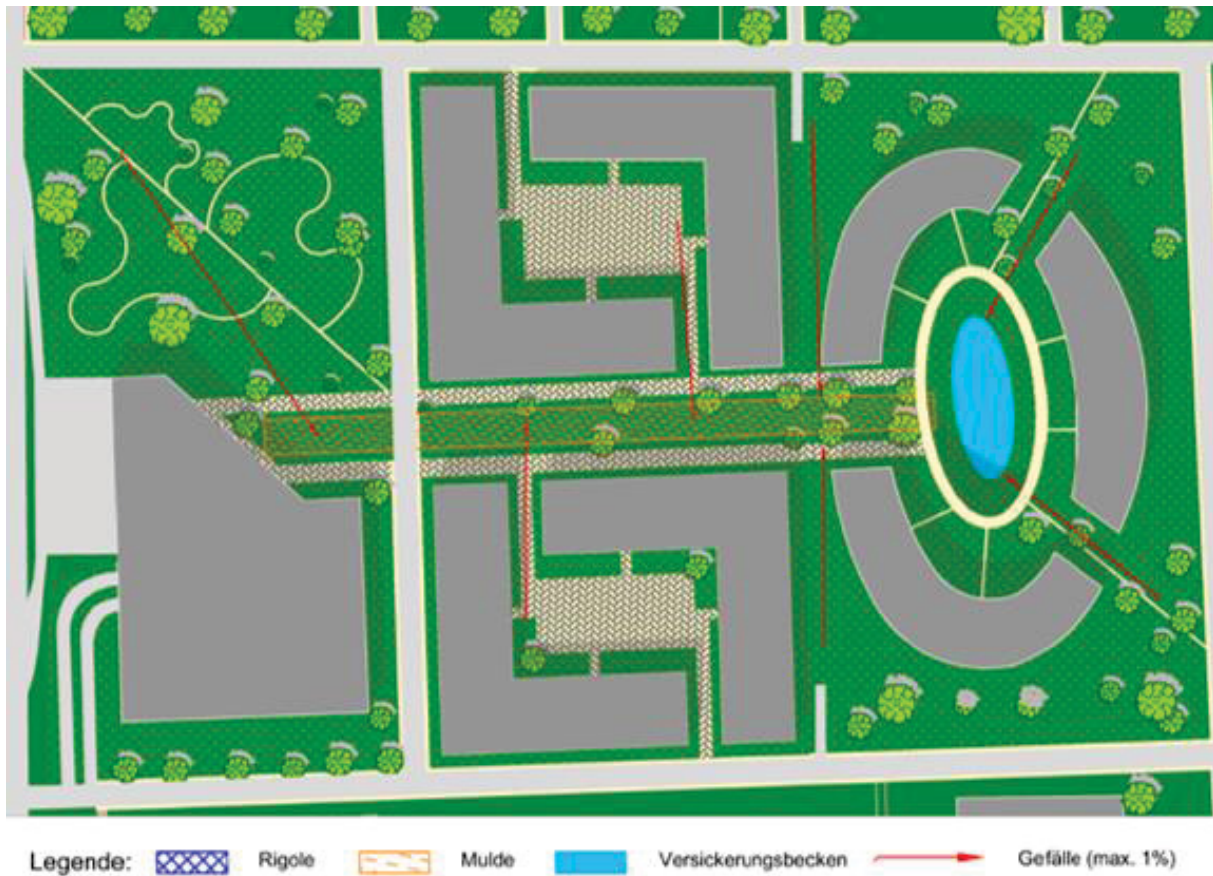


Abbildung 30: Versickerungskonzept – Bangalore, Indien

#### 4.4.1.5 PHOENIX, USA

Aufgrund des Wüstenklimas mit hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen, sollen die anfallenden Wassermengen zur Versickerung möglichst gleichmäßig verteilt werden. Da mit hohen Evatranspirationswerten zu rechnen ist, wurde auf Versickerungsanlagen, die auf der Oberfläche liegen (wie Mulden oder Versickerungsbecken) verzichtet. Stattdessen ist der gesamte Bereich mit gleichmäßig verteilten Rigolen geplant, die als unterirdische Speicher das Niederschlagswasser versickern. Die erforderliche Rigolenlänge  $I_R$  errechnet sich mit Hilfe der Formel (10) und erreicht für die maßgebliche Regenspende von 45 Minuten:

$$I_R = \frac{[(A_u) * 10^{-7} * r_{D,n}]}{\frac{b_R * h_R * S_{RR}}{D * 60 * f_z} + \left(b_R + \frac{h_R}{2}\right) * \frac{k_f}{2}} = \mathbf{146,83 \text{ m}} \quad (10)$$

Das Versickerungskonzept und die Anordnung der Rigolen ist in der Abbildung 31 dargestellt. Insgesamt wurden 160 m Rigolen für das gesamte Grundstück vorgesehen.



Abbildung 31: Versickerungskonzept – Phoenix, USA

#### 4.4.2 REGENWASSERWIEDERVERWENDUNG – DÄCHER

In dem Kapitel 3.2 wurden die wichtigsten Eigenschaften des Systems zur Wiederverwendung des Regenwassers ausführlich beschrieben und werden folgend entsprechend für alle Fallbeispiele dimensioniert. Aufgrund der verschiedenen Verteilungen des Niederschlagsabfalles im Jahr (siehe Tabelle 4), werden die Speicher mit Betrachtung der eventuellen Trockenzeiten (in Bangalore und Phoenix) entsprechend groß geplant. Weiterhin richtet sich die geplante Begrünung der Fassade bzw. Balkone nach dem vorhandenen Regenwasser und überschüssigen Grauwasser. Auf diese Weise bilden die Elemente keine zusätzliche Belastung für die Trinkwasserversorgung an dem Standort.

$$E_R = h_N * \eta * A_A * e \quad (11)$$

Zuerst wird mit der Formel (11) [41, S. 27] die Größe des jährlichen Regenwasserertrages ( $E_R$ ) in der bestimmten Region berechnet. Die Ergebnisse dieser Abschätzung sind in Tabelle 15 zusammengefasst und basieren auf folgenden Annahmen:

- Eine prozentuale Verteilung der bestimmten Dachoberflächen und zuständigen Ertragsbeiwerten ( $e$ ) nach DIN 1989-1 wurde in Tabelle 15 beschrieben,
- Für den hydraulischen Filterwirkungsgrad  $\eta$  wird ein Wert von 0,9 angenommen (Annahme nach DIN 1989-1 [41, S. 27]),
- Die maximale jährliche Niederschlagshöhe ( $h_N$ ) wurde aus den Angaben in Tabelle 4 entnommen,
- die vorhandenen Dachflächen je Gebäude ( $A_A$ ) sind in Tabelle 8 berechnet worden.

**Tabelle 15: Berechnung der jährliche Regenwasserertrag**

Spezifische Werte		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Die Niederschlagshöhe $h_N$ in mm		666	570	831	211
Einkaufszentrum		80 % extensive Begrünung, 20 % Kiesbelag,			
Bürogebäude 1-4		40% intensive Begrünung, 40 % extensive Begrünung, 20 % Kiesbelag,			
Wohnhaus 1-3		50% intensive Begrünung, 30 % extensive Begrünung, 20 % Kiesbelag,			80 % extensive Begrünung, 20 % Kiesbelag,
jährlicher Regenwasserertrag $E_R$ in m <sup>3</sup>	Einkaufszentrum	1.714,3	1.467,2	2.139,0	543,1
	Bürogebäude	712,1	609,4	888,5	225,6
	Wohnhaus 1	402,8	344,7	502,6	127,6
	Wohnhaus 2	352,4	301,6	439,8	111,7
	Wohnhaus 3	453,1	387,8	565,4	143,6

Die in Tabelle 15 errechneten Werte stellen eine jährlich verfügbare Regenwassermenge pro Gebäude dar. Eine Dimensionierung des Regenwasserspeichers wird für den summierten Wasserbedarf aller geplanten Sondernutzungen im folgenden Kapitel durchgeführt.

## 4.5 ERARBEITUNG DER KONZEPTE

Die Konzepte für jeden Standort werden mit Betrachtung einer innovativen und kreativen Nutzung für alternative Wasserressourcen geplant. Diese sind immer auf die regionale Verfügbarkeit des Brauchwassers und dem kleinstmöglichen Qualitätsanspruch abgestimmt. Mit entsprechenden Anlagen wäre es möglich, das alternative Wasser auf eine Trinkqualität aufzubereiten, da es sich in der Arbeit jedoch um ein Stadtteil mit ausgebauten Trinkwassernetz handelt, wurde dieses Konzept nicht weiterverfolgt.

In Tabelle 6 wurden vorab die möglichen Verwendungen für das Regen- bzw. Grauwasser sowie geeignete Low Development Systeme aufgelistet. Im Folgenden werden diese pro jeweiliger Region bzw. Nutzung detailliert beschrieben.

### ADIABATE ABLUFTBEFEUCHTUNG

Das in dem Kapitel 3.4 beschriebene System zur Klimatisierung der Gebäude wird vorab in allen vier Regionen betrachtet. In der Regel werden die Wohngebäude mit keinem mechanischen Lüftungssystem ausgestattet. Deswegen wird die adiabate Abluftbefeuchtung nur in Bürogebäuden eingesetzt.

Der Wasserverbrauch des Systems wird mittels eines Erfahrungswertes aus der Justus-von-Liebig-Schule in Landkreis Waldshut bestimmt. Bei einem Befeuchtungswirkungsgrad von 50 % wurde der Wasserverbrauch an einem heißen Tag auf ca. 1 m<sup>3</sup> geschätzt. Dies entspricht einer Temperaturreduktion bei 38 °C Außentemperatur auf 21 °C Zulufttemperatur oder einer Kühlleistung von 180 kW [96].

Es wurde angenommen, dass die Bürogebäude in allen Standorten gleiche Kühlleistung von  $\leq 360$  kW haben und somit im Kühlzeitraum täglich ca. 2 m<sup>3</sup> Wasser zur Verdunstkühlung benötigen.

Die Abschätzung des Bedarfes wird auf Grundlage der Tage im Jahr, an denen die maximale Außentemperatur höher als 24 °C (untere Grenze des Komfortbereiches nach DIN 1946-2:1994-01) ist. Die detaillierten Klimadaten befinden sich in Anhang 11. Die Ergebnisse der Schätzungen und der voraussichtliche Wasserverbrauch für adiabate Kühlung wurde in Tabelle 16 zusammengefasst.



Tabelle 16: Dimensionierung des Regenwasserverbrauches für adiabate Kühlung

	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Anzahl der Tage mit max. Außentemperatur hoher 24 °C	59	30 (abgeschätzt)	365	275
Anfallende Niederschlagshöhe in der Kühlzeitraum in mm	91	57	831	144
Annahme zur Speicher	Der Niederschlag ist in der Kühlzeitraum regelmäßig verteilt, somit ist eine Speicherung für ca. 5 Tage Betrieb vorgesehen.	Der Niederschlag ist in der Kühlzeitraum regelmäßig verteilt, somit ist eine Speicherung für ca. 5 Tage Betrieb vorgesehen.	Der Kühlzeitraum umfasst drei Monaten der nahezu absoluten Trockenzeit (Jan – März), somit soll der Speicher für ca. 90 Tage Betrieb dimensioniert werden.	Der Kühlzeitraum umfasst drei Monaten der nahezu absoluten Trockenzeit (Apr – Juni), somit soll der Speicher für ca. 90 Tage Betrieb dimensioniert werden
Dimensionierung des Wasserverbrauches für die adiabate Kühlung pro Bürogebäude	<b>10,0 m<sup>3</sup></b>	<b>10,0 m<sup>3</sup></b>	<b>180,0 m<sup>3</sup></b>	<b>180,0 m<sup>3</sup></b>

Der in Tabelle 16 geschätzte Wasserbedarf für adiabate Kühlung ist in Bangalore und Phoenix aufgrund der langen Trockenperioden erheblich groß und stellt somit keine effiziente Lösung dar. Eine Alternative bietet hier die Nutzung der verfügbaren Sonneneinstrahlung zur Stromerzeugung mittels Photovoltaikanlagen und Verwendung dieser Energie zum Betrieb der Gebäudekühlung. Diese Arbeit konzentriert sich lediglich auf Wassereffizienz, deswegen wird das Konzept nur als Ansatz erwähnt und nicht weiter betrachtet.



## VERDUNSTKÜHLUNG DURCH GESTALTUNG

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der Verdunstungsenergie zur Temperaturreduktion im Raum sind Gestaltungselemente wie künstliche Flüsse oder Springbrunnen. Besonders wichtig bei der Planung dieser Elemente ist jedoch der große Wasserbedarf und die Betrachtung der hygienischen Anforderungen. Es ist davon auszugehen, dass das Wasser in Kontakt mit dem menschlichen Körper kommt (z. B. Kinder, die möglicherweise in den Springbrunnen oder Fluss springen), deswegen muss das Wasser frei von allen für Menschen schädlichen Stoffen sein. Durch gewisse Sicherheitsmaßnahmen (z. B. Schilder mit der Information, dass sich in dem Fluss bzw. Springbrunnen kein Trinkwasser befindet) wird die Nutzung des Brauchwassers (voraussichtlich Regenwasser) zu diesen Zwecken erlaubt. Jedoch wird empfohlen, eine gewisse Reinigung des Wassers inklusive Desinfektion (z. B. UV-Desinfektion) durchzuführen.

Das Konzept wird aufgrund nicht ausreichender Regenwassermengen in Phoenix nicht vorgesehen. In den gemäßigten Klimazonen (Berlin und Melbourne) kann die direkte Wasserverdunstung in Kälteperioden eine gewisse Unbehaglichkeit für die Nutzer darstellen und gilt als eine zusätzliche Herausforderung in der Winterzeit, in der das Wasser von dem Erfrieren geschützt sein müsste. Deswegen ist auch hier die Regenwassernutzung nicht empfohlen.

In Bangalore ist das Konzept der direkten Wasserverdunstung aufgrund klimatischen Bedingungen besonders gut geeignet. Zu beachten ist hier vor allem die Monsunzeit von Juni bis September in der mit langzeitigen Starkregen zu rechnen ist. Diese wird voraussichtlich mit Regenbewirtschaftungsanlagen, die in dem Kapitel 4.4.1.4 dimensioniert wurden, nicht sofort versickern. Das Muldensystem wurde absichtlich in der Mitte des Grundstücks angeordnet um eine Art Abflussrinne zu bilden, die eine große Wassermenge ableiten kann. Das Wasser wird in den vorhandenen Becken gesammelt und von da unterirdisch zum Einkaufszeitzentrum geleitet, um durch den Springbrunnen erneut in das künstlich gebildete Fließgewässer zu gelangen. Die Funktionsweise des Systems wurde schematisch in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

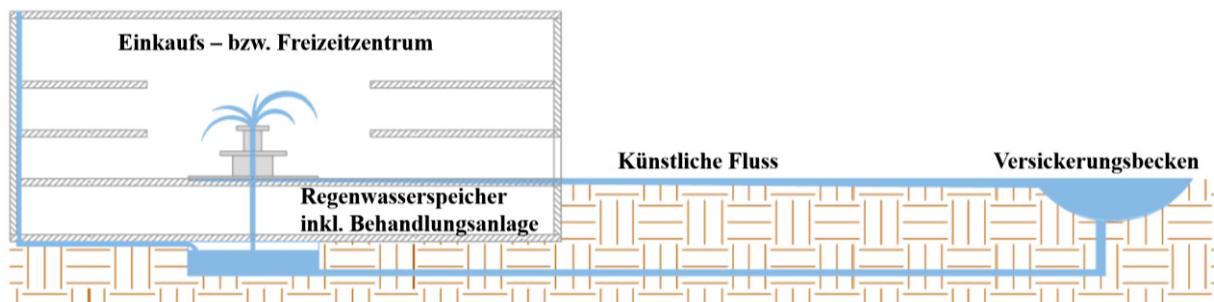


Abbildung 32: Konzept der Verdunstkühlung mittels Gestaltung in Bangalore, Indien - Schnitt, o. M.

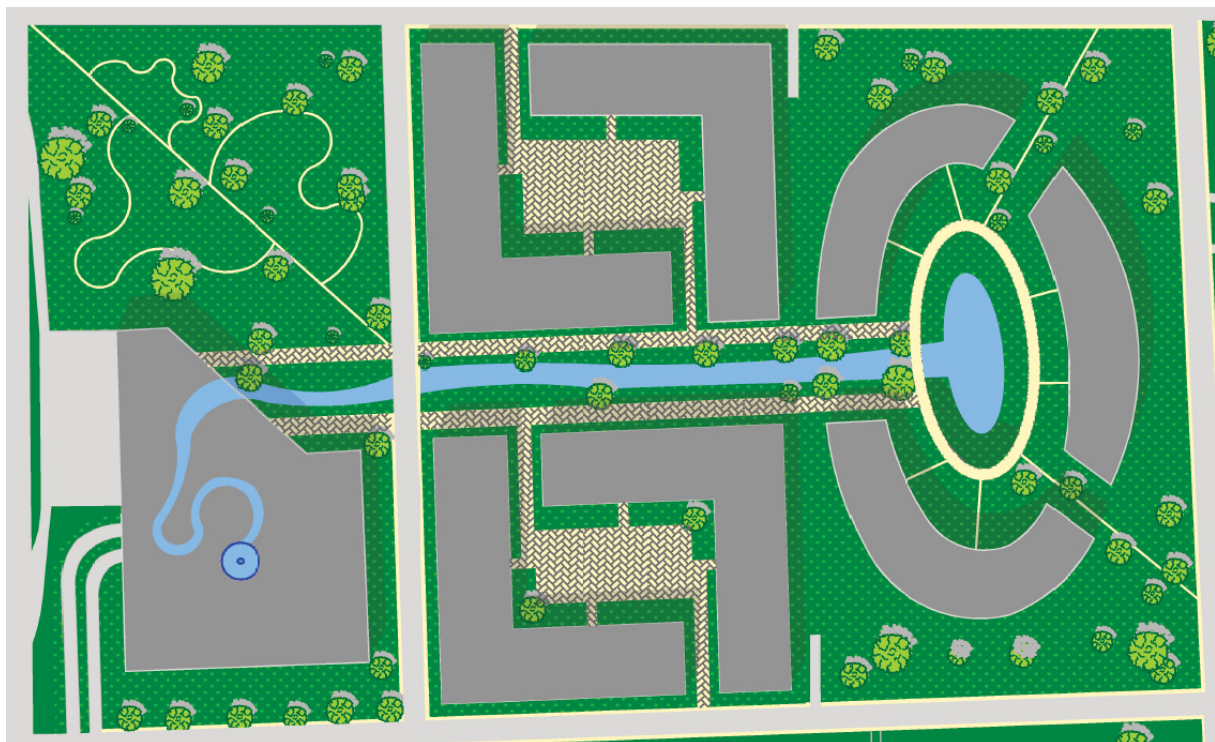


Abbildung 33: Konzept der Verdunstkühlung mittels Gestaltung in Bangalore, Indien - Grundriss, o. M.

## DACH- UND FASSADEN BEGRÜNUNG

Unter dem Begriff „passive Kühlung“ werden alle Maßnahmen beschrieben, die zur Temperaturreduktion im Gebäudeinneren beitragen, z. B. Dach- und Fassadenbegrünung. Diese Elemente werden in allen betrachteten Regionen integriert. Die Unterschiede zwischen der Gestaltung der Dach- und Fassadenbegrünung basieren vor allem auf dem vorhandenen Brauchwasser zur Bewässerung und dem regionalen Klima. Bei der Planung wird zwischen sechs möglichen Anwendungen der Gebäudebegrünung unterschieden: intensive oder extensive Dachbegrünung, „lebende Balkone“, Fassadenbegrünung mit Kletter- oder Hängepflanzen, lebende Wände und urbane Gärten zur Produktion von Konsumgütern. Die Begrünungskonzepte für alle Städte wurden in Tabelle 17 zusammengetragen.

Zu beachten ist jedoch, dass das Grauwasser aufgrund des höheren Kontaminierungsgrades sich nicht für die Bewässerung der Vegetation, die zum Konsumzwecken genutzt wird eignet. In den geplanten urbanen Gärten soll ausschließlich das wenig verschmutzte Regenwasser benutzt werden.

Die Begrünung in jeder Region soll mit einheimischen Pflanzen, die an die jeweiligen Klimabedingungen angepasst sind, gestaltet werden.

**Tabelle 17: Begrünungskonzepte**

	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Extensive Dachbegrünung	✓	✓	✓	✓
Intensive Dachbegrünung	✓	✓	✓	✗
Lebende Wände	✓	✓	✓	✓
Fassadenbegrünung	✓	✓	✓	✓
lebende Balkone	✗	✗	✓	✓
Urbane Gemeinschaftsgarten	✓	✓	✓	✗

Die Verteilung von intensiver und extensiver Begrünung auf den Dächern wurde in Tabelle 15 prozentual angegeben. Die Bereiche mit extensiver Dachbegrünung bieten eine attraktive Aufstellfläche für Photovoltaikanlagen, die die Effizienz des Standortes positiv beeinflussen. Der Kiesbelag wird im Attikabereich als Drainage sowie in den erforderlichen Wartungswegen geplant. Die vorgesehene intensive Begrünung wird auf dem Bürogebäude als Pausenbereich attraktiv gestaltet. Auf den Wohnhäusern bieten die Grünanlagen eine Möglichkeit, Gemeinschaftsgärten für die Bewohner zu integrieren. In Phoenix wurde aufgrund der geringen Niederschläge sowie der relativ geringen Grauwasserverfügbarkeit auf intensive Dachbegrünung sowie urbane Gärten verzichtet.

Die Fassadengestaltung mit Grünelementen wird durch die Verbindung von Bausegmenten der lebenden Wände und Kletter- bzw. Hängepflanzen gestaltet. Eine Proportion der Begrünungssysteme wird auf Grundlage des verfügbaren Brauchwassers und der gewählten Pflanzenarten bestimmt. In Trockengebieten wie Phoenix sind vor allem Sukkulente zu empfehlen, die den geringsten Wasserbedarf von allen Pflanzenarten aufweisen und durch ihre kleinen Wurzelsysteme typischerweise trockene Bedingungen bevorzugen. In weiteren

Regionen (Melbourne, Berlin, Bangalore) gibt es größere Auswahl an Pflanzen zur Gestaltung der Fassadenbegrünung. Zu beachten sind jedoch die gewählten Aufstellorte. Die Pflanzen, die im Schatten wachsen, benötigen etwa ein Drittel des Wassers der sonnenliebenden Pflanzen [97]. Der Grund dafür ist vor allem eine erhöhte Verdunstungsleistung aufgrund der solaren Einstrahlung. Eine Abschätzung des Wasserbedarfes und somit der prozentualen Verteilung von lebenden Wänden und Kletterpflanzen an den Fassaden der jeweiligen Gebäude und Region wird auf Grundlage von Erfahrungswerten abgeschätzt. Die verwendeten Werte wurden aus dem Monitoring des Instituts für Physik der Humboldt-Universität zu Berlin in Adlershof, die in Abbildung 34 dargestellt, entnommen.

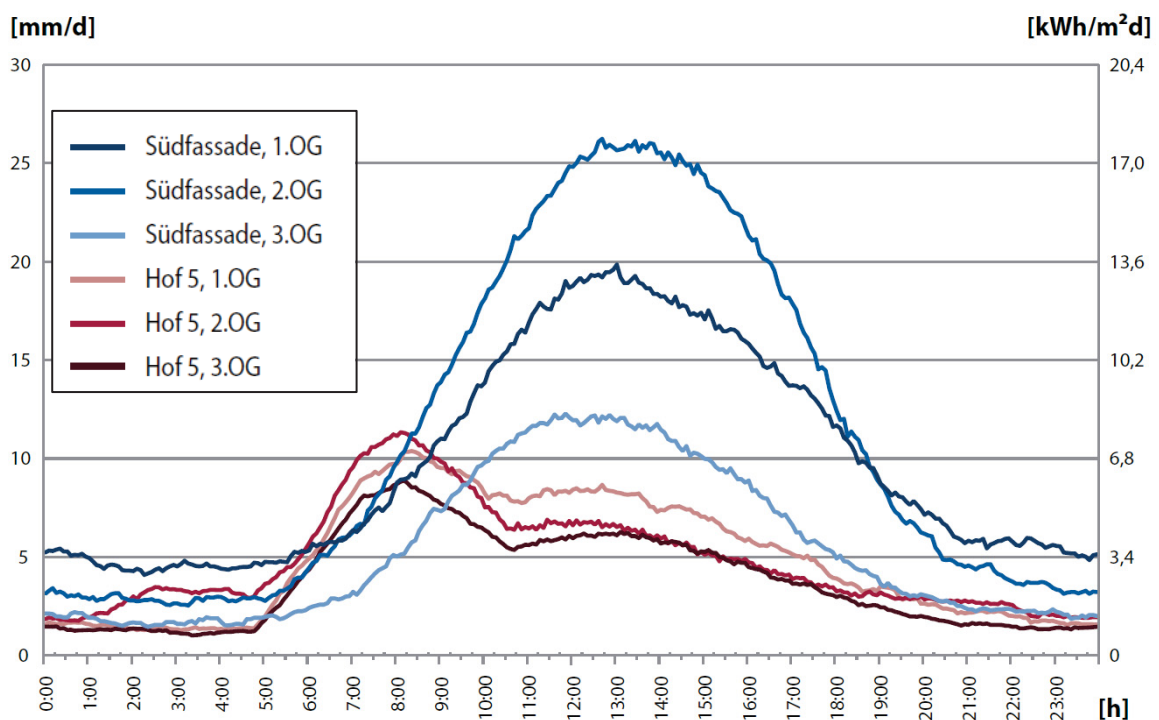


Abbildung 34: Durchschnittliche Verdunstung und Wasserbedarf der Fassadenbegrünung, [27, S. 36]

Bei der Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Fassadenflächen werden durch die Multiplikation des Gebäudeumfanges mit der Gebäudehöhe von 12 m bestimmt.
- Annahme: 50 % der Fassade sind Fensterflächen.
- Nur die lebenden Wände benötigen Bewässerung. Die Flächen, die mit dieser Art der Begrünung bedeckt sein können, werden durch das täglich verfügbare Brauchwasser (Grau- und Regenwasser) bestimmt. Die restlichen Fassadenflächen werden mit Kletterpflanzen gestaltet.

- Das verfügbare Wasser zur Bewässerung wird pro Tag bestimmt und errechnet sich aus dem überschüssigen Grauwasser aus Tabelle 10 und der Regenwassermenge, die pro Tag zur Verfügung steht. Diese errechnet sich aus dem jährlichen Regenwasserertrag  $E_R$  (siehe Tabelle 15) geteilt durch 365 Tage.
- Der Wasserbedarf für Bewässerung wird pro Gebäude abgeschätzt.
- Die Himmelsausrichtung der Fassaden wird vernachlässigt.

**Tabelle 18: Verteilung der Fassadenbegrünung**

Spezifische Werte		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Verfügbares Bewässerungswasser pro Tag in m <sup>3</sup>	Einkauszentrum	4,7	4,0	5,9	1,5
	Bürogebäude	4,9	4,6	5,3	3,5
	Wohnhaus 1	4,0	3,7	4,7	2,0
	Wohnhaus 2	3,4	3,2	4,1	1,7
	Wohnhaus 3	4,7	4,2	5,3	2,4
Fassadenfläche die mit lebenden Wänden bedeckt sein kann in m <sup>2</sup>	Einkauszentrum	470	400	Nicht vorgesehen	300
	Bürogebäude	490	460	530	700
	Wohnhaus 1	400	370	470	400
	Wohnhaus 2	340	320	410	340
	Wohnhaus 3	470	420	530	480
Prozentuale Anteil der Fassadenfläche mit lebenden Wänden	Bürogebäude	27 %	25 %	29 %	39 %
	Wohnhaus 1	32 %	29 %	37 %	32 %
	Wohnhaus 2	28 %	29 %	34 %	28 %
	Wohnhaus 3	34 %	30 %	38 %	35 %

Die Berechnung aus Tabelle 18 zeigt, dass in allen Regionen das anfallende Wasser für Begrünung der Fassade mit lebenden Wänden von einem Viertel bis zu einem Drittel der Fassadenflächen ausreichend ist. Diese Bereiche sollen eine Basis für Kletter- oder Hängepflanzen bilden, die die restlichen Fassadenflächen abdecken sollen. Die Bewässerungsleistung der Fassadenbegrünung kann verbessert werden, indem das Wasser, das nach dem Bewässerungsvorgang durch Gravitation auf dem Boden fällt, gesammelt und erneut zum Speicher geleitet wird.

Bei der Planung einer sinnvollen Regenwassernutzung in dem Einkaufszeitzentrum stellt die passive Kühlung mittels innen liegender Grünflächen (z. B. lebende Wände) in Melbourne, Berlin und Phoenix (das Konzept für Bangalore umfasst Verwendung von Regenwasser in Springbrunnen und künstlichen Fluss - siehe vorherige Kapitel) eine attraktive Alternative dar. Die Grünanlagen werden jeweils in repräsentativen Bereichen des Gebäudes, wie Empfangsbereich oder Treppenhäuser geplant. Ein detaillierter Entwurf wird in dieser Arbeit jedoch nicht erstellt.

Das Konzept der lebenden Balkone umfasst das Wachstum von hohen Pflanzen in speziell angeordneten Balkonkästen, um eine natürliche Verschattung zu erreichen. In Melbourne und Berlin würden die Pflanzen eine klimabedingte Vegetationsruhe mit eventuellen Laubausfall durchlaufen. Daraus würde bei den lebenden Balkonen ein erhöhter Wartungsbedarf ergeben und wird somit nicht empfohlen.

Die in Tabelle 17 dargestellten Begrünungskonzepte beschreiben lediglich die Lösungen für die jeweiligen Gebäude. Zu beachten ist jedoch der zusätzliche Wasserbedarf für weitere öffentliche Bereiche wie Parks, Grünstreifen und Rasenflächen auf dem Grundstück. Eine interessante Möglichkeit zur Bewässerung der öffentlichen Grünanlagen während Trockenzeiten stellen die in dem Kapitel 3.2.3 beschriebenen Wasserbänke. Da das Konzept sich zurzeit noch in einer Pilotphase befindet, wird es hier nicht weiter betrachtet.

#### 4.6 ZUSAMMENFASSUNG DER KONZEPTE

Die Erkenntnisse aus dem Kapitel 4 werden im Folgenden zusammengefasst. Die Tabelle 19 bildet eine Zusammenstellung der Informationen aus Tabelle 10 (Grauwasser) und Tabelle 15 (Regenwasser) sowie eine Dimensionierung der erforderlichen Speicher pro Gebäude und Region dar.

**Tabelle 19: Zusammenfassung der Brauchwasserverbrauch und Dimensionierung der erforderlichen Speicher**

Dimensionierung der Speicher		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Voraussichtliche Verfügbarkeit des Grauwassers pro Tag in m <sup>3</sup>	Bürogebäude	5,4			
	Wohnhaus 1	3,5	3,7	7,6	2,4
	Wohnhaus 2	2,8	3,2	6,6	2,0
	Wohnhaus 3	4,2	4,1	8,6	2,8



Dimensionierung der Speicher		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Erf. GW-Speicher für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	Bürogebäude	2,5			
	Wohnhaus 1	0,3	0,5	2,1	0,3
	Wohnhaus 2	0,2	0,4	1,9	0,3
	Wohnhaus 3	0,3	0,5	2,4	0,4
GW-Speicher für Waschmaschinen und Bewässerung in m <sup>3</sup>	Bürogebäude	2,9	2,9	2,9	2,9
	Wohnhaus 1	3,2	3,2	5,5	2,1
	Wohnhaus 2	2,6	2,8	4,7	1,7
	Wohnhaus 3	3,9	3,6	6,2	2,4
Gewählte RW-Speicher für Bewässerung in m <sup>3</sup>	Einkaufszentrum	≈ 100	≈ 80	≈ 500	≈ 140
	Bürogebäude	≈ 40	≈ 35	≈ 200	≈ 60
	Wohnhaus 1	≈ 25	≈ 20	≈ 125	≈ 30
	Wohnhaus 2	≈ 20	≈ 20	≈ 100	≈ 30
	Wohnhaus 3	≈ 25	≈ 20	≈ 140	≈ 35

Der Regenwasserspeicher wird als Ergänzung der Grauwasseranlage geplant. Diese dient vor allem als Sicherung in den Perioden, in denen nicht ausreichend Grauwasser zur Waschmaschinen und Toilettenspülung anfällt. Zusätzlich dient das Regenwasser als Quelle für Wasser zur Reinigungs- und Bewässerungszwecken. Das Volumen des Regenwasserspeichers wird nach DIN 1989-1 [41, S. 29] als ca. 6 % des jährlichen Regenwasserertrages dimensioniert. In Bangalore und Phoenix wird das Volumen aufgrund der ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung im Jahr, der zur mindestens drei monatigen Trockenzeit führt auf ca. 25 % erhöht.

Die gewählten Nutzungen für das Brauchwasser werden schematisch in einem Piktogramm für jede der betrachteten Gebäudeart dargestellt.

Die Farbe der Pfeile wird mit der steigenden Kontaminierung des Wassers immer dunkler. Die gestrichelten Linien weisen auf indirekte Beziehungen zwischen bestimmten Aktivitäten, z. B. gereinigtes Abwasser wird an die natürliche Umgebung (hier die natürliche Oberflächen- oder Grundwasserleiter) abgegeben, von da aus wird es zur Trinkwasserbereitung gewonnen und kann somit erneut in den Kreislauf gelangen.

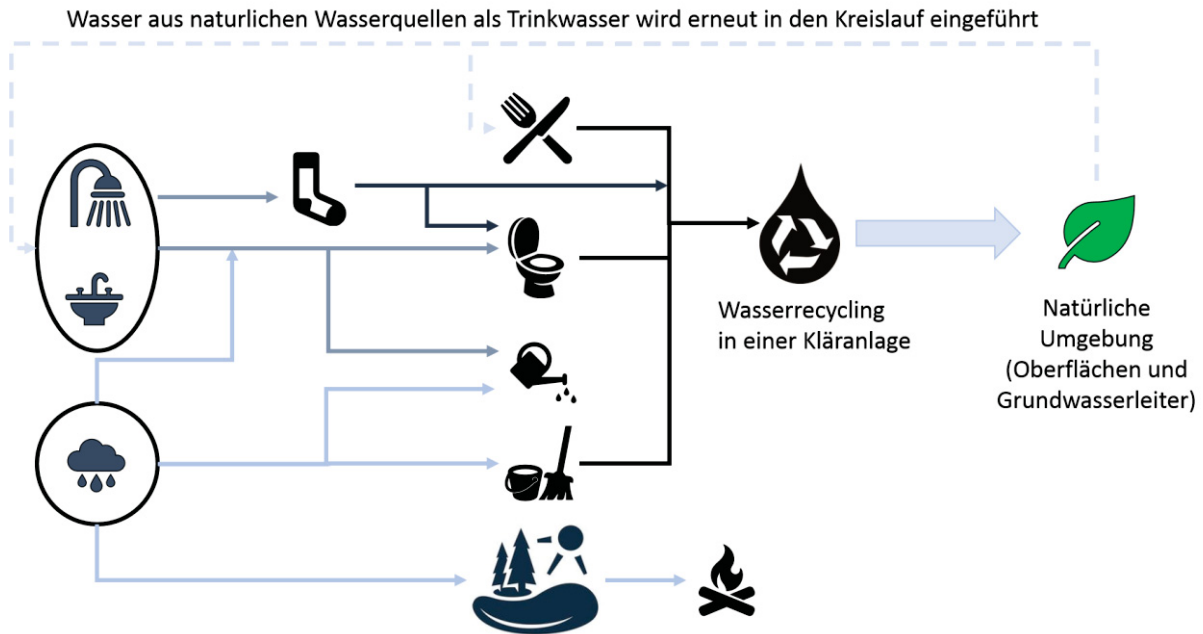


Abbildung 35: Nutzungskonzept für die alternativen Wasserquellen in dem Wohngebäude

Das Nutzungskonzept für die alternativen Wasserquellen in den Wohngebäuden ist in allen Regionen gleich und wurde in Abbildung 35 dargestellt. Hier wird der Fokus vor allem auf die Nutzbarkeit der Systeme gesetzt. Das Grauwasser wird für Waschmaschine, Toilettenspülung und Bewässerung der Fassadenbegrünung verwendet. Das Brauchwasser aus der Waschmaschine wird voraussichtlich doppelt wiederverwendet, in dem das Abwasser erneut zur Toilettenspülung geleitet wird. Das Regenwasser dient als Ergänzung des Grauwassersystems, also zur Überbrückung der Spitzenlasten, wenn möglicherweise nicht genug Grauwasser für die geplanten Einsatzbereiche zur Verfügung steht. Weiterhin wird das Regenwasser zu Reinigungs- und Bewässerungszwecken genutzt.

Ein allgemeines Konzept für alle betrachteten Regionen wird auch in dem Fall des Einkaufszentrums erstellt und ist in Abbildung 36 dargestellt.

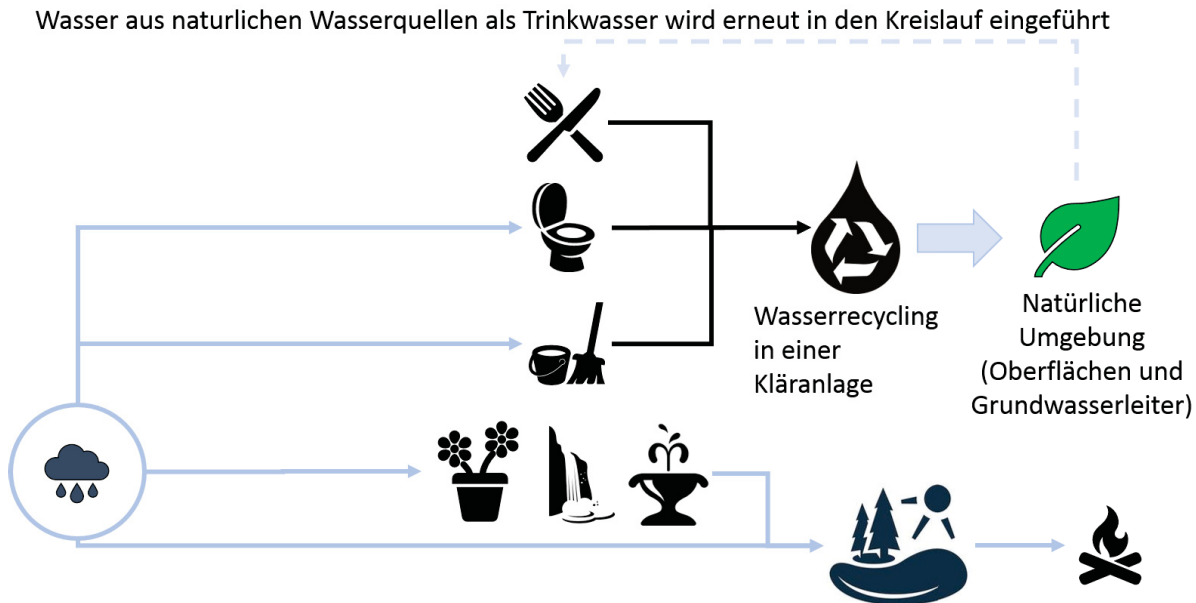


Abbildung 36: Nutzungskonzept für alternative Wasserquellen in dem Einkaufszentrum

Die Besonderheit des Konzeptes für das Einkaufszentrum stellt die gestalterische Umsetzung der Anlagen zur passiven Kühlung. Hier wurden zwei Methoden unterscheiden: eine direkte Verdunstkühlung aus den Wasserflächen (Springbrunnen und künstliche Fluss) in Bangalore und eine Verdunstkühlung mittels Grünanlagen im Innenraum (Lebende Wände) in Melbourne, Berlin und Phoenix.

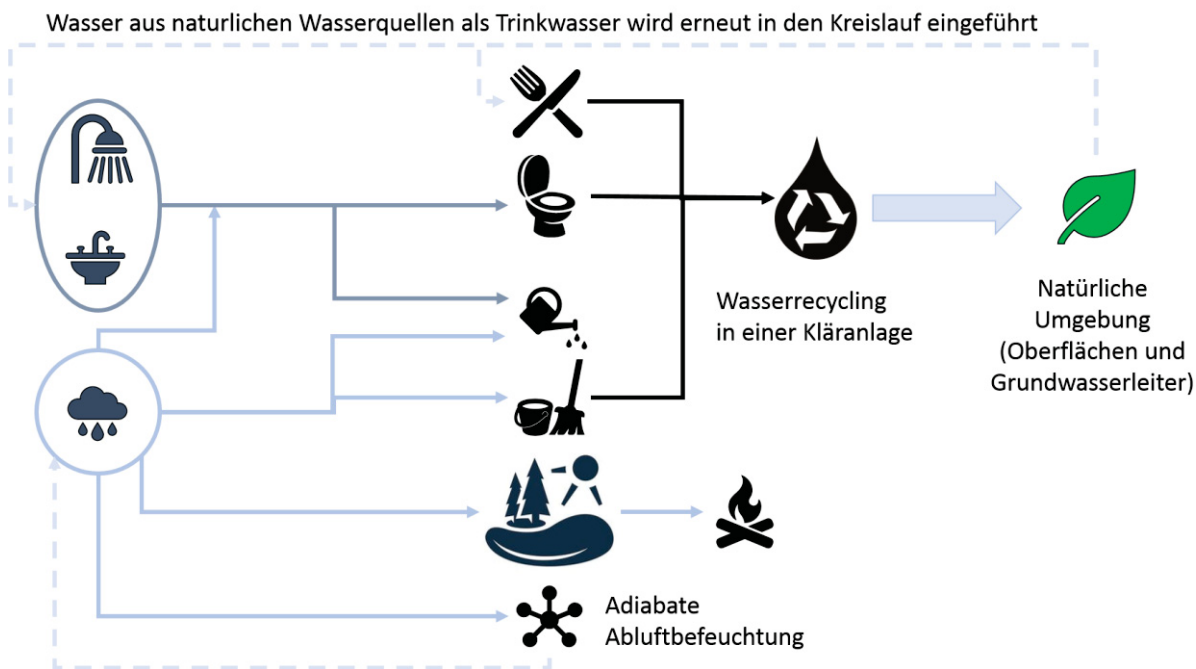


Abbildung 37: Nutzungskonzept für alternative Wasserquellen in dem Bürogebäude

Bei der Erstellung des Nutzungskonzeptes für Bürogebäude wurden zwei Varianten vorgeschlagen: eine für gemäßigte Klimazonen wie Melbourne und Berlin (Abbildung 37) und die zweite für warme Klimaregionen wie Bangalore und Phoenix (gleich wie Abbildung 37 jedoch ohne adiabate Abluftbefeuchtung). Der Unterschied zwischen den Konzepten liegt in Melbourne und Berlin bei der Nutzung des Regenwassers zur Klimatisierung der Gebäude mittels adiabater Abluftbefeuchtung. Die Berechnung aus dem Kapitel 4.5 zeigt, dass diese Nutzung aufgrund von langen Trockenperioden und fehlender Verfügbarkeit von Niederschlag in Bangalore und Phoenix nicht wirtschaftlich wäre.

Das überschüssige Regenwasser wird von allen Gebäuden und in allen Regionen (außer Phoenix) zur Versickerungsbecken eingeleitet, wo es als eventuelle Quelle für Löschwasser (Brandschutz) zur Verfügung steht.

Die erarbeiteten Konzepte stellen eine nahezu hundert prozentige Verwendung von anfallenden Grauwasser und größtmögliche Speicherung und Wiederverwendung von Regenwasser dar. In dem Kapitel 5 werden diese Konzepte auf deren Vorteile und Defizite bewertet.

## 5 BEWERTUNG DER KONZEPTE

---

*In diesem Kapitel wird eine Bewertung der erarbeiteten Konzepte erfolgen. Der Fokus wird auf die Bewertung im Sinne der Nachhaltigkeit mittels Anforderungen der Gebäudezertifizierung gelegt.*

### 5.1 EFFIZIENZ UND NACHHALTIGKEIT

Zertifizierungssysteme bilden eine verlässliche Methode zur Bewertung der Effizienz und Nachhaltigkeit eines Gebäudes. Durch die Verwendung von einheitlichen Kriterien werden für die entsprechenden Kategorien spezifische Benchmarks bestimmt. Auf der Grundlage dieser Werte ist ein sinnvoller Vergleich von Gebäuden mit gleicher oder ähnlicher Nutzung möglich. Die Zertifikate dienen dazu, die hohe Qualität eines Gebäudes öffentlich sichtbar zu machen.

Die Bewertungssysteme betrachten mehrere Nachhaltigkeitsaspekte in Bereichen wie Standort, Ressourcenmanagement, Transport, Energie, Wirtschaft und Innovation. Der Fokus wird bei der Bewertung der erarbeiteten Konzepte lediglich auf Themen, die in der Arbeit angesprochen wurden gelegt. Diese umfassen die Wassereffizienz, Regenwasserbewirtschaftung und Low impact development Methoden. Die Kriterien aus anderen Themenbereichen werden vernachlässigt.

#### 5.1.1 REGIONALE BEWERTUNG

Die Bewertung auf der regionalen Ebene wird für die Konzepte auf der Basis der länderspezifischen Zertifizierungssysteme untersucht. Die Zertifikate werden in der Regel für einzelne Gebäude vergeben. Um eine Vergleichsbasis zu bilden, wird von jedem Konzept lediglich das Bürogebäude betrachtet.

Die folgenden Zertifizierungssysteme werden in den betrachteten Ländern ausgewählt:

- Australien – Green Star unterstützt durch Green Building Council of Australia.
- Deutschland – Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) unterstützt durch der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen.

- Indien – Green Rating for Integrated Habitat Assessment (GRIHA) unterstützt durch The Energy and Resources Institute, New Delhi und Ministry of New and Renewable Energy.
- USA – Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) unterstützt durch die US Green Building Council.

Folgende Angaben für das Bürogebäude werden für die Bewertungen angenommen:

- Nutzfläche des Gebäudes: **6.900 m<sup>2</sup>**
- Anzahl Mitarbeiter: **450 Personen** (50 % Männer und 50 % Frauen)
- Bewässerung der Dächer (intensive Begrünung) sowie Fassadenbegrünung erfolgt mittels unterirdischen Tropfbewässerung (sub-surface drip irrigation).
- Wassersparende Sanitärarmaturen:
  - Toilette mit zwei Mengen Spülung von **3,5/2 l/Spülung**
  - Urinal mit **2 l/Spülung**
  - Waschbecken mit einem Durchfluss von **6 l/min**
  - Dusche mit einem Durchfluss von **7,5 l/min**
  - Geschirrspüler mit Verbrauch von **6,5 l/Zyklus**

Alle Berechnungsunterlagen wie Tabellen und Rechen Tools für bestimmte Zertifikate sowie die Bewertungstabellen befinden sich auf der angehängten CD.

#### 5.1.1.1 AUSTRALIEN – GREEN STAR ZERTIFIKAT

Im Bewertungssystem Green Star fließen alle erreichten Punkte gleichwertig in die Gesamtbewertung ein. Insgesamt 100 Punkte sind in neun Hauptkategorien verteilt: Management, Innenraumqualität, Energie, Transport, Wasser, Material, Landnutzung und Ökologie, Emissionen und Innovation. Die Projekte werden abschließend in einer Skala von eins (Minimum Practice) bis sechs Sterne (World Leadership) bewertet [98].

In Tabelle 20 wurden aus der Green Star Scorecard die Kriterien, die für das Bürogebäude relevant sind, ausgewählt und entsprechend bewertet.



Tabelle 20: Die Bewertung des Bürogebäudes - Green Star - Design and As Built, [98]

Nr.	Bezeichnung	Bewertung	Erreichte Punkte
18A	Potable Water, Performance Pathway	Aus der in „Potable Water Calculator“ [98], [99] durchgeführten Berechnung wurde eine Einsparung von 84 % gegenüber dem durchschnittlichen Verbrauch von einem Referenzgebäude erreicht.	10/12
23,1	Ecological Value	Die Vegetation auf dem Gebäude (Fassaden- und intensive Dachbegrünung) ist mit einheimischen Pflanzenarten geplant.	2,9/3
25,0	Heat Island Effect Reduction	Das Gebäude verfügt über ein Gründach.	1/1
26,1	Reduced Peak Discharge	Das gesamte Regenwasser wird versickert oder auf dem Grundstück wiederverwendet. Somit wird der Spitzenabfluss der jedes zweite Jahr auftritt, auf dem Grundstück verwaltet.	1/1
26,2	Reduced Pollution Targets	Es ist davon auszugehen, dass das Wasser die Mindestanforderungen der Green Building Council nicht überschreitet. Die genauen Werte sind in Anhang 11 zu finden.	1/1
28,0	Legionella Impacts from Cooling Systems	Es ist von einer strengen Kontrolle und Verhinderung der Legionellenbildung, die aufgrund der adiabaten Abluftbefeuchtung in dem Lüftungssystem entstehen können, auszugehen.	1/1
<b>Summierte Bewertung in betrachteten Kriterien</b>			<b>16,9/19</b>
<b>Anteil an der Gesamtbewertung des Zertifikates</b>			<b>16,9/100</b>

Wie in Tabelle 20 gezeigt, wurden 89% der Punkte aus betrachteten Kategorien erreicht. In Bezug auf die Gesamtbewertung erreicht das Konzept 16,9 von 100 möglichen Punkten. Somit wird alleine für die Wassereffizienz Aspekte bereits ein Stern an das Gebäude vergeben (1 Stern = Minimum Practice für 10-19 Punkte, die Mindestanforderungen wurden vernachlässigt) [100].

#### 5.1.1.2 DEUTSCHLAND – BNB ZERTIFIKAT

Die Bewertung in der BNB System erfolgt in sechs Hauptkategorien: Ökologische, ökonomische Qualität, soziokulturelle und funktionale, technische, Prozess- und Standortqualität, wobei die Standortmerkmale – da planerisch nur eingeschränkt veränderbar - keinen Einfluss auf der Gesamtbewertung haben. Jede dieser Kategorien ist in mehreren Unterpunkten unterteilt, die jeweils mit einem unterschiedlichen Prozentansatz und Bedeutungsfaktor 1-3 (geringe bis hohe Bedeutung) in das Endergebnis einfließen [101].

Tabelle 21 stellt eine Auswahl von relevanten Kriterien aus dem deutschen Bewertungssystem [102] und eine Bewertung für das Bürogebäude dar.

**Tabelle 21: Bewertung Bürogebäude – BNB Büro- und Verwaltungsgebäude, [102]**

Nr.	Bezeichnung	Bewertung	Erreichte Punkte
1.2.3	Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	Mit Hilfe der „Rechnenhilfe-Trinkwasser“, die vom BNB zur Verfügung gestellt wurde, wurde ein Verhältnis von 0,13 Wassergebrauchskennwert zum Grenzwert von BNB erreicht. Somit ist die maximale Punktzahl in dieser Kategorie erreicht.	100/100
<b>Summierte Bewertung in betrachteten Kriterien</b>			100/100
<b>Anteil an der Gesamtbewertung des Zertifikates</b>			<b>2,5 %/ 100 %</b>

Wie in Tabelle 21 dargestellt, bezieht sich im deutschen Bewertungssystem nur ein Kriterium auf die Wasserthematik. Auch wenn innerhalb des Kriteriums die maximale Einsparung erreicht wurde, wurden in Bezug auf die Gesamtbewertung lediglich 2,5 % der maximalen Punkte erreicht. Diese ist vor allem durch den niedrigen Bedeutungsfaktor von Wassereinsparungsmaßnahmen bedingt. Anteilig wird jedoch die Wassereffizienz in der Berechnung von Lebenszykluskosten betrachtet, diese sind aufgrund nicht vollständigen Informationen zu Konstruktion und Energieverbrauch des Gebäudes, in dieser Arbeit nicht bewertbar.

#### 5.1.1.3 INDIEN – GRIHA ZERTIFIKAT

Das Green Rating for Integrated Habitat Assessment (GRIHA) ist eine im Jahr 2007 gestartete Initiative zur Förderung nachhaltiger Lebensräume in Indien. Das Zertifizierungssystem umfasst insgesamt 34 Kriterien in den Bereichen: Standortauswahl und Standortplanung, Konservierung und effiziente Nutzung von Ressourcen, Gebäudebetrieb und Wartung sowie Innovationen [103].

Die Tabelle 22 stellt eine Auswahl sowie die Bewertung der Kriterien, die an das Bürogebäude anzuwenden sind.

Tabelle 22: Bewertung Bürogebäude – GRIHA V – 2015, [104]

Nr.	Bezeichnung	Bewertung	Erreichte Punkte
2	Low-impact design	Vier vorgeschlagenen Strategien zur Low impact design wurden in das Gebäude integriert: Reduktion der Aufheizung durch Dach- und Fassadenbegrünung, Schattenerzeugung durch Bepflanzung und die Regenwasserbewirtschaftungssysteme (SUDS).	4/4
3	Design to mitigate UHIE	Der Urban Heat Island Effect (UHIE) wird dank der Dachbegrünung und Planung eines unterirdischen Parkplatzes um mehr als 50 % reduziert.	2/2
4	Site Imperviousness Factor	Dank den Versickerungsanlagen wird der Niederschlag vollständig auf dem Grundstück verwaltet.	1/1
14	Use of low-flow fixtures and systems	Der Wasserverbrauch in dem Bürogebäude wurde gegenüber dem durchschnittlichen Verbrauch bei gleicher Ausstattung um 73 % reduziert.	4/4
15	Reducing landscape water demand	Das Projekt nutzt fast 65 % weniger Wasser zur Bewässerung der Außenanlagen als der durchschnittliche Verbrauch in Indien.	4/4
16	Water Quality	Das auf dem Grundstück verwendete Wasser wird gemäß der entsprechenden Qualitätsanforderung gereinigt, eine Kläranlage wird jedoch auf dem Grundstück nicht vorgesehen.	0/2
17	On-site water reuse	Nahezu 100 % Grauwasser und Regenwasser aus dem Grundstück wird wiederverwendet somit ist es anzunehmen, dass mehr als 80 % des Jahresverbrauchs mit Brauchwasser abgedeckt wird.	5/5
18	Rainwater Recharge	Die geplanten Regenwasserbewirtschaftungssysteme dienen als Systeme zur Grundwasserneubildung.	2/2
26	Dedicated facilities for service staff	In dem Bürogebäude ist jeweils mit mindestens eine Damen- und Herren Toilette pro Geschoss zu rechnen.	1/2
31	Innovation	Keine innovativen Lösungen im Sinne GRIHA-Zertifikat wurden implementiert.	0/2
<b>Summierte Bewertung in betrachteten Kriterien</b>			<b>23/28</b>
<b>Anteil an der Gesamtbewertung des Zertifikates</b>			<b>23/ 100</b>

Dank der Anwendung von wassereffizienten Armaturen sowie Integration von Regenbewirtschaftungssysteme wurden 23 von 100 Punkten in dem Bewertungssystem erreicht, wie in Tabelle 22 dargestellt. Von allen Kriterien, die sich auf Wassermanagement beziehen, erreicht das Bürogebäude 82 % der möglichen Punkte. Die GRIHA schlägt als mögliche Innovationen im Bereich Wassermanagement zwei Möglichkeiten vor: der Einbau einer Kläranlage, die keine Chemikalien zur Reinigung des Wassers verwendet oder die

Ausführung eines Net-Zero-Water Systems (unabhängig vom städtischen Netz). Beide Konzepte wurden in dieser Arbeit aufgrund der Annahme zur vorhandenen Anbindung an kommunale Trink- und Abwasserleitungen nicht betrachtet.

#### 5.1.1.4 USA – LEED ZERTIFIKAT

Die LEED - Leadership in Energy and Environmental Design ist zurzeit eines der bekanntesten Zertifizierungssysteme der Welt (in den USA und weiteren 135 Ländern angewendet). Die Bewertungsmatrix basiert auf der 100-Punkte Skala, mit zehn zusätzlichen Punkten für Innovationen und regionale Priorität. Durch Erfüllung bestimmter Kriterien werden entsprechende Punkte gesammelt, in Abhängigkeit von der erreichten Punktzahl, erhält das Gebäude ein Zertifikat in Silber, Gold oder Platin [105]. Alle von insgesamt 54 Kriterien sind in acht Gruppen verteilt: Lage und Transport, nachhaltiger Standort, Wassereffizienz, Energie und Atmosphäre, Materialien und Ressourcen, inneres Klima, Innovationen und regionale Priorität.

Tabelle 23: Bewertung Bürogebäude – LEED v4 Building Design and Construction, [106]

Bezeichnung	Bewertung	Erreichte Punkte
Location and Transportation - Bicycle facilities	Die geplante Umkleide und die Duschbereiche in dem Bürogebäude beziehen sich auf eine voraussichtliche Nutzung von Fahrräder als Transportmittel. Es wurde angenommen, dass die LEED -Anforderungen (max. Abstand zu Gebäude = 180 m, Fahrradständer für mind. 5% der Mitarbeiter und Duschköglichkeit für mind. 100 Mitarbeiter) eingehalten wurden.	1/1
Sustainable Sites - Open space	Wenn mind. 30 % der Grundstücksfläche als attraktive Außenbereiche mit mind. 25 % Vegetationsfläche gestaltet ist, wird ein Punkt vergeben. In dem Bürogebäude wurde dieses Kriterium dank des Landschaftsdachgarten, der 40 % der Dachfläche bedeckt, erfüllt.	1/1
Sustainable Sites - Rainwater management	Auf Grundlage von jährlichen Niederschlagsmengen aus den letzten 16 Jahren [107] wurde mit Hilfe der „Rainfall Events Calculator“ die Anteil des Regenwassers, die auf dem Grundstück verwaltet wird, bestimmt. Dank der Dach- und Fassadenbegrünung sowie Verwendung des Regenwassers zur Toilettenspülung, wurde ein Management von 98,18 % des Niederschlages nachgewiesen.	3/3
Sustainable Sites - Heat island reduction	Die Punkte werden für die Reduktion des Heat Island Effect vergeben. Ein Punkt wird jeweils für den Gründach und die Tiefgarage erreicht.	2/2

Water Efficiency - Outdoor water use reduction	Die Punkte in dieser Kategorie werden erreicht, wenn der Bewässerungsbedarf um 50 % (1 Punkt) oder 100 % (2 Punkte) gegenüber der analogischen Verwendung unter Betrachtung des Durchschnittsverbrauchs erreicht wird. Mit Hilfe des „Water Budget Tool“ [108] wurde eine Reduktion von 78 % nachgewiesen.	1/2
Water Efficiency - Indoor water use reduction	Die Punkte in der Kategorie werden in Abhängigkeit von der Reduktion des Wasserverbrauchs gegenüber der von LEED angegebenen Baseline (Durchschnittsverbrauch für analoge Nutzung) vergeben. Mit Hilfe der „Indoor Water Use Reduction Calculator“ wurde für das Bürogebäude eine Reduktion von 53,72 % errechnet.	6/6
Water Efficiency - Cooling tower water use	Die in dem Bürogebäude geplante adiabate Kühlung wird analog zu den Kühltürmen bewertet. Die Punkte in dem Kriterium werden erreicht, wenn die Qualität des zur Kühlung genutzten Wassers ständig entsprechende Anforderungen entspricht. Ein weiterer Punkt wird für die Nutzung von mind. 20 % des Recyclingwassers zur Kühlzwecken vergeben.	2/2
Innovation: Sustainable wastewater management	In LEED wird ein Punkt für Reduktion des Abwasseraufkommens aus Toiletten und Urinale durch Wiederverwendung von Grau- oder Regenwasser vergeben.	1/1
<b>Summierte Bewertung in betrachteten Kriterien</b>		17/18
<b>Anteil an der Gesamtbewertung des Zertifikates</b>		<b>18/ 100</b>

Die in Tabelle 23 zusammengefasste Bewertung bezieht sich auf alle Kriterien im LEED Zertifikat, die Einfluss auf Wassereffizienz auf dem Grundstück haben. Diese Kriterien wurden in das Konzept zu 95 % umgesetzt. In Bezug auf Gesamtbewertung erreicht das Konzept 18 von 100 möglichen Punkten.

#### 5.1.1.1 ZUSAMMENFASSUNG

Fasst man die Erkenntnisse aus den Kapiteln 5.1.1.1 bis 5.1.1.4 zusammen, sind in den betrachteten Regionen deutliche Unterschiede bei dem Umgang mit Wasser zu sehen. Diese deuten auf bestimmte Prioritäten, die auf der regionalen Ebene gefördert werden. In Indien ist eine mögliche Abkopplung von der zentralen Versorgung (Einbau einer Kläranlage auf dem Grundstück oder Ausführung des Gebäudes als ein Net-Zero Water System) als eine innovative Lösung, aufgrund des raschen Bevölkerungswachstums, das zur einer Überfüllung und Beeinträchtigung der bereits veralteten Leitungen führt, gesondert bewertet [52]. In den anderen Städten, die in der Arbeit betrachtet wurden, erfolgt diese Umwandlung deutlich langsamer, deswegen stellen die zentralen Lösungen (zentrale Trinkwasserbereitung und Abwasserbehandlung) immer noch eine effiziente Variante dar. In der Arbeit wurde von der

Verwendung von Bestandsquellen und Leitungen ausgegangen. Eine Abkopplung von der städtischen Versorgung kann sich in Großstädten wie Berlin, Melbourne oder Phoenix negativ auf die bestehenden kommunalen Netze auswirken, z. B. durch Druckreduktionen in den Leitungen müssen die Pumpenleistungen erhöht werden, was mit einer Erhöhung des Energieverbrauches und zusätzlichen Kosten verbunden wäre. Ein reduzierter Verbrauch kann in den Trinkwassernetzen zum Wassereinstau führen, was zu hygienischen Problemen, wie z. B. Legionellenbildung führen kann.

Der sehr geringere Anteil an Punkten für Wassereffizienz in der BNB Zertifizierungssystem bedeutet, dass die Nachhaltigkeitsziele in Deutschland sich auf andere Bereiche konzentrieren, vor allem auf den Energieversorgungsbereich. Der Hauptgrund dafür sind die Ressourcenkosten, die bei Strom in Deutschland deutlich höher liegen als die von Wasser [1, S. 109]. Am Beispiel Berlins, wo die durchschnittlichen Stromkosten 0,2916 €/kWh [109] betragen, werden bei einem Jahresverbrauch von ca. 2200 kWh/Jahr pro Haushalt [110] jährlich 640 Euro als reine Energiekosten ausgegeben. Im Vergleich werden pro Haushalt lediglich ca. 42 m<sup>3</sup>/Jahr Trinkwasser und ca. 32 m<sup>3</sup>/Jahr Abwasser (Annahme Tagesverbrauch von 115 l, davon 75 % Abwasser [61]) genutzt. Das ergibt bei den aktuellen Preisen von 1,7 €/m<sup>3</sup> Trinkwasser und 2,3 €/m<sup>3</sup> Abwasser [111] eine Jahresbetrag von 150 Euro. Somit betragen die Wasserkosten pro Haushalt in Deutschland lediglich ¼ der Stromkosten.

Die Bewertungen auf Grundlage der Zertifikate aus Australien (Green Star) und den USA (LEED) zeigen, dass die Anforderungen an die Reduktion des Wasserverbrauches im Innenraum in Australien geringfügig höher als in den USA sind. Interessant ist, dass in dem US-amerikanischen Bewertungssystem die Wiederverwendung von Regen- und Grauwasser im Bereich Innovationen eingestuft wurde, obwohl es eine weit verbreitete und bekannte Praxis darstellt. Hier ist auch anzudeuten, dass bei der Berechnung des Wasserverbrauches im LEED-System die Einsparung aus der Nutzung von alternativen Wasserquellen nicht betrachtet ist. Diese Tatsache kann zur Vernachlässigung solcher Lösungen bei der Planung auf der Grundlage von LEED Anforderungen führen.

### 5.1.2 GLOBAL

Global gesehen sind die regionalen Zertifizierungssysteme ein attraktiver Weg zur Förderung der Nachhaltigkeit, sollten jedoch strengere Regelungen zur Wassereffizienz, vor allem in Deutschland, integrieren. Das Potential zur Verbrauchsreduktion durch die Wasserwiederverwendung wurde in allen Bewertungssystemen erkannt und entsprechend in



die Nachhaltigkeitskriterien integriert. Die Zertifikate in Australien, Indien und USA haben zusätzliche Vorteile, die sich aus der Implementierung von Low Impact Development Methoden wie Dach- und Fassadenbegrünung für das Gebäude ergeben, erkannt und entsprechend in separaten Kriterien belohnt. Hervorheben kann man hier vor allem die Punkte, die für die Reduktion des Heat Islands Effektes vergeben wurden. Diese Maßnahme birgt ein großer Beitrag zum Erreichen der Ziele des Pariser Abkommens, einer Vereinbarung der Vereinten Nationen, die am 12. Dezember 2015 im Rahmen der Weltklimakonferenz COP21 (21st Conference of Parties) durch 195 Länder geschlossen wurde. Der Fokus dieser Vereinbarung liegt bei der Begrenzung der globalen Erwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf deutlich unter 2 °C, gegenüber dem vorindustriellen Niveau [112, S. 3]. Weiterhin wurden in allen Bewertungssystemen (außer deutscher BNB) die Regenwasserbewirtschaftungsanlagen positiv bewertet. Dieses zeigt eine Tendenz beim nachhaltigen Bauen, die auf natürliche Systeme und Methoden zurückgreift.

## 5.2 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

Im Folgenden werden die Grau- und Regenwassernutzungsanlagen ökonomisch bewertet. In der Bewertung wurde ein Einsparpotential bestimmt, der sich aus der Reduktion der Trink- und Abwasserkosten ergibt, die Werte wurden in Tabelle 24 zusammengefasst.

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Zur Vereinfachung wurden die Kosten nur für das Bürogebäude bewertet.
- Die Investitionskosten der Anlagen wurden aufgrund deren Komplexität nicht betrachtet (Anschaffungskosten pro Anlagen, Montagekosten Einbau erforderlichen Leitungen, Behandlungsanlagen etc.).
- Die Betrachtung den Regenwasserbewirtschaftungssystemen wird aufgrund von fehlenden Informationen zu den Kosten vernachlässigt.
- Als Annahme zum Gesamtverbrauch des Brauchwassers gilt:
  - Der Verbrauch für WC = (450 Personen) x (3 Mal/Tag) x (3,5 l + 2 l + 2 l) Spülung,
  - Bewässerung mit maximal verfügbaren Wasser (siehe Tabelle 18) multipliziert mit 365 Tagen im Jahr.

**Tabelle 24: Einsparungspotential aufgrund der Nutzung vom Regen- und Grauwasser im Bürogebäude**

Kosten umgerechnet in Euro	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Brauchwasserverbrauch im Jahr	5.500 m <sup>3</sup>	5.400 m <sup>3</sup>	5.600 m <sup>3</sup>	5.000 m <sup>3</sup>
Trinkwasserkosten	2,55 €/m <sup>3</sup> [113]	1,70 €/m <sup>3</sup> [111]	0,62 €/m <sup>3</sup> [52]	1,14 €/m <sup>3</sup> [114]
Abwasserkosten	1,25 €/m <sup>3</sup> [113]	2,30 €/m <sup>3</sup> [111]	1,72 €/m <sup>3</sup> [52]	1,03 €/m <sup>3</sup> [114]
Kosteneinsparung im Jahr	20.900 €	21.600 €	13.100 €	10.850 €

Tabelle 10 zeigt die jährliche Einsparung unter der Annahme, dass die Toiletten und das Wasser zur Bewässerung der Fassaden- und Dachbegrünung im Regelfall mit Trinkwasser versorgt wurden. In dem Konzept wurde in diesen Bereichen das Brauchwasser genutzt, deswegen sind die jährlichen Trink- und Abwasserverbräuche um die Menge des Brauchwassers reduziert.

Das Einsparpotenzial ist in Deutschland und Melbourne deutlich höher als in Bangalore und Phoenix. Ein Grund dafür können erhöhte Qualitätsansprüche an das Wasser in diesen Regionen sein. Die Preise stellen einen über das Jahr gemittelten Wert dar, da in Melbourne das Trinkwasser in den Trockenzeiten aus der Entsalzungsanlage kommt, ist es mit deutlich höheren Reinigungskosten, als bei Wasser aus einem Fließgewässer oder Grundwasser zu rechnen, was sich in dem Durchschnittspreis widerspiegelt. In Berlin dagegen sind die Abwasserkosten höher als die für das Trinkwasser. Dies ist mit einer relativ hohen Qualität des Grundwassers und somit mit geringerem Reinigungsbedarf, der zur Trinkwasserbereitung gebraucht wird, im Vergleich zu dem Aufwand, der zur Behandlung des Abwassers erforderlich ist, verbunden.

Mehrere Studien, die weltweit die Effizienz der Anlagen zur Wiederverwendung von Regenwasser durchgeführt wurden zeigen, dass in einem urbanen Raum der reguläre Trinkwasserverbrauch um 20 % bis 60 % durch den Einsatz von Brauchwasser reduziert werden kann (siehe Kapitel 3.1.3 und 3.2.4). Die Einsparung hängt immer von den klimatischen Bedingungen, der Größe der Sammelflächen und Speicher sowie den möglichen Einsatzbereichen ab. Die Amortisationszeiten für die Investitionskosten der Systeme zur Wiederverwendung von Wasser variieren in den jeweiligen Ländern und sind vor allem durch Faktoren wie eingesetzte Maschinen- und Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik,

des festgelegten Reinigungsziels sowie des Aufwands für Wartung, Inspektion, Ersatz- und Verschleißteilebedarf, abhängig. In der Regel werden sich die Investitionskosten innerhalb von 10 bis 60 Jahren amortisieren [8, S. 812], [32, S. 8].

### **5.3 ÖKOLOGISCHE ASPEKTE**

Die erarbeiteten Konzepte sind aus der ökologischen Betrachtung sehr positiv zu bewerten. Durch die Integration von Grünanlagen mit einheimischen Pflanzen wird die regionale Flora unterstützt. Anlagen wie die Landschaftsgärten auf den Dächern sowie das Versickerungsbecken bilden einen zusätzlichen Lebensraum für mehrere Pflanzenarten und Tiere. Die Fassadenbegrünung bildet ein einzigartiges Mikroklima, die das Leben- und die Aufenthaltsqualität auf dem Standort attraktiv macht.

Die Wiederverwendung von Grau- und Regenwasser kann die Umweltbelastungen aufgrund von Entladungen des behandelten Abwassers in die Fließgewässer reduzieren. Hier sind vor allem die Versickerungsanlagen, die den Niederschlag vor Ort verwalten, für die natürliche Umgebung besonders wichtig. Diese Abkopplung von den Fließgewässern unterstützt durch die Verdunstung und Grundwasserneubildung das örtliche Mikroklima und die Ressourcen. Auch die Gefahr einer Überschwemmung in den städtischen Bereichen wird durch die deutliche Reduktion des Abflusses (siehe Abbildung 7) aus undurchlässigen Flächen viel geringer [19, S. 1–11].

Die Bewertungen in den Zertifizierungssystemen (außer dem betrachteten BNB-System) fördern Einbau von den Regenwasserbewirtschaftungssystemen. In Deutschland gibt es ein separates Zertifikat: „BNB Außenanlagen von Bundesliegenschaften“, das die Thematik Versickerungsanlagen betrachtet. Dieses zeigt eine Tendenz beim nachhaltigen Bauen, die auf natürliche Systeme und Methoden zurückgreift. Heutzutage sollen die Gebäude in Harmonie mit der Umgebung und Umwelt gebaut werden, was zur Reduktion der menschlichen Einflüsse auf den Klimawandel führt. Aus diesem Grund sind die in der Arbeit vorgeschlagenen Lösungen nicht als eine Innovation zu sehen, sondern als ein effizienter und nachhaltiger Weg, die Architektur in der Stadt zu gestalten.

## 6 FAZIT

---

*Dieses Kapitel ist eine Zusammenfassung aller Erkenntnisse aus der Arbeit.*

### 6.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse der Bewertung zeigen, dass die dargestellten Konzepte eine Grundlage zur Entwicklung und Planung der urbanen Räume in Verbindung mit Wassereffizienz und Nachhaltigkeit in bestimmten Regionen bilden können. Die vorgeschlagenen Lösungen, wie die Wasserwiederverwendung sowie Low Impact Development Systeme, beeinflussen sowohl auf regionaler als auch auf globaler Ebene positiv die Umgebung, bieten eine Kosteneinsparung und eine gewisse Unabhängigkeit von den städtischen Netzen bei der Wasserversorgung. Zusätzlich bilden die Konzepte aufgrund des hohen Anteils an Grünanlagen einen attraktiven Wohn- und Aufenthaltsort.

Die Analyse der möglichen Nutzungen von dem Regen- und Grauwasser zeigt, dass das Wasser kein Abfall, sondern eine wertvolle Ressource ist, die in mehreren Bereichen das Trinkwasser ersetzen kann. Das in dem Kapitel 3 beschriebene „fit-for-purpose“ Prinzip bietet viele ökonomische (Reduktion der jährlichen Trink- und Abwasserkosten) sowie ökologische (Reduktion des produzierten Abwassers und geringere Belastung an den Fließgewässern) Vorteile für Gebäude und ihre Umgebung.

Ein besonderer Wert für den urbanen Raum wurde durch die Anwendung von Versickerungsanlagen auf dem Grundstück erreicht. Die durchgeführten Bewertungen auf Grundlage von regionalen Nachhaltigkeitskriterien zeigen mehrere Vorteile, die sich aus der Verwaltung von Regenwasser vor Ort ergeben, vor allem die Reduktion des städtischen Abflusses und die damit verbundene Verminderung der Überflutungsgefahr sowie die Grundwasserneubildung, die zur Regeneration der lokalen Grundwasserreserven führt.

In dieser Arbeit wurde eindeutig nachgewiesen, dass die Regionen mit höheren Jahresniederschlagsmengen, wie Melbourne, Berlin und Bangalore eine größere Flexibilität bei der Auswahl von möglichen Einsatzbereichen bieten. Dies ist vor allem durch die Variabilität der Nutzung in den jeweiligen Konzepten zu sehen. In Deutschland und Australien ist die

Brauchwasserversorgung ausreichend, um in den Sommermonaten die Gebäude durch eine adiabate Abluftbefeuchtung zu kühlen. Im Bangalore fällt ausreichend Regenwasser um eine künstliche Wasserlandschaft zu versorgen. In der Wüstenregion Phoenix reicht das jährliche Regenwasser lediglich für die „reguläre“ Verwendung wie WC-Spülung und Bewässerung, wobei auch hier anzudeuten ist, dass die gewählten Pflanzenarten an das Trockenklima angepasst sein sollen.

Auch die gewählten Low Impact Development Methoden, wie Dach- und Fassadenbegrünung, zeigen positive Einflüsse für das Gebäude und dessen Umgebung. Die Bepflanzung der Gebäudehülle reduziert die solaren Gewinne im Sommer, mindern somit die Innenraumtemperatur im Gebäude und bringen dadurch Energie- und Kosteneinsparungen. Zusätzlich bieten die Pflanzen eine Alternative für die Entsorgung des überschüssigen Grau- und Regenwassers, das in dem Gebäude gesammelt wurde, indem es zu Bewässerungszwecken verwendet wird. Die bewässerten Pflanzen bilden durch die Schattenerzeugung und Evapotranspiration ein spezifisches Mikroklima, das zur Erhöhung der Attraktivität des Aufenthaltsorts beiträgt. Die geplanten Dachlandschaftsgärten bringen auf den Wohngebäuden weitere soziale und ökonomische Vorteile für die Bewohner, in dem sie als Gemeinschaftsgärten zur Produktion von Konsumgütern verwendet werden können.

Zusammengefasst werden in der Zukunft die Nutzung nichtkonventioneller Wasserressourcen, die maximale Ausnutzung und lokale Verwaltung des Niederschlages sowie die an die Nutzung angepasste Behandlungstechnologien des Abwassers eine wesentliche Rolle bei der Sicherung der langfristigen Wasserversorgung spielen. Somit sollten die Regierungen in eine intelligente, blaugüne (Korrelation zwischen Wasser- und Energieeffizienz) Stadtentwicklung investieren. Durch die Förderung dieser Art der urbanen Entwicklung können die zukünftigen Städte zur Bewältigung der Wasserknappheit, Verbesserung der Wasserqualität und Regeneration der Wasserressourcen einen Beitrag leisten. Eine gelungene Planung erfordert jedoch Beobachtungen der vielfältigen Wechselwirkungen sowie der verschiedenen sozialen, ökologischen, ökonomischen, rechtlichen und politischen Aspekte.

## 6.2 VERBESSERUNGSPOTENZIALE

Die in der Arbeit erarbeiteten Konzepte sehen die Wohnnutzung als dicht besiedelte Mehrfamilienhäuser, die auf allgemeinen Benchmarks für Wasserversorgung und durchschnittlichen Wohnflächenbedarf pro Person in den betrachteten Städten ausgelegt sind. Der Wasserverbrauch in einer Mietwohnung ist jedoch in der Regel deutlich kleiner, als der in einem Einfamilienhaus mit Garten, wo der Bedarf an Bewässerungswasser hoch ist. Somit sind die städtischen Benchmarks in Melbourne und Phoenix, wo geschätzt 80 % der Stadtteile aus Einfamilienhäusern bestehen, nicht an das in der Arbeit vorgeschlagene Nutzungskonzept angepasst. In der Praxis sollte die Planung immer den tatsächlichen Verbrauch für bestimmte Region mit Betrachtung der Nutzung berücksichtigen.

Auch in Bangalore entspricht der angegebene Benchmark für den Wasserverbrauch nicht der tatsächlichen Situation in der Stadt. Aufgrund des raschen Bevölkerungszuwachses und Ansiedlungen in den Stadtrandgebieten, ist der lokale Versorger (BWSSB) nicht in der Lage, alle Stadtbewohner mit Trinkwasser zu versorgen. Aus diesem Grund wird von der BWSSB ein durchschnittlicher Verbrauchswert pro Bewohner von 65 l/Tag angegeben [52]. Dieser Wert liegt jedoch unter den von WHO vorgeschlagenen Mindestverbrauch von 107 l/Tag, der für ein hygienisches und gesundes Leben erforderlich ist [115] und wird somit als nicht glaubwürdig eingestuft. Der in der Arbeit verwendete Benchmark bezieht sich auf einen Verbrauch, der für ganz Indien bestimmt wurde und stellt somit nur ein Richtwert dar.

Die geplanten Systeme werden nur dann die vorgesehenen Vorteile für die Stadt bringen, wenn sie großflächig umgesetzt werden. Um diesen Zweck zu erreichen, sind jedoch Maßnahmen zur Steigerung der sozialen Wahrnehmung der akuten Wasserkrise erforderlich. Diese kann zum Beispiel durch die Regulierung von Wasserpreisen erfolgen. Mit einer Erhöhung der Kosten für die Trinkwasser- und Abwasserversorgung könnten die Stadtbewohner auf die Wasserknappheit aufmerksam gemacht werden, was zur einer möglichen Reduktion des Verbrauches führen kann. Auch die Amortisationszeit der Investitionen im Bereich Wasserwiederverwendung würden deutlich niedriger sein, was zur Erhöhung der Anzahl dieser Systeme führen könnte. Solche Regulationen sollen vor allem in Trockenregionen, wie z. B. Phoenix eingeführt werden, um einen verschwenderischen Wasserverbrauch zu verhindern. Weiterhin sind entsprechende Förderungen für den Einbau von Grau- und Regenwasseranlagen eine mögliche Methode um diese Systeme für Bewohner attraktiv zu machen.



Ein weiterer Aspekt, der betrachtet sein sollte, ist die Wechselwirkung zwischen Energie und dem alternativen Wasser. Jedes System zur Wiederverwendung von Wasser benötigt zur Funktion elektrische Energie. Eine besonders attraktive Lösung ist die Verbindung von regenerativen Erzeugungsanlagen, wie Photovoltaik und Systemen zur Wasserwiederverwendung. Eine Synergie wird in diesem Fall erreicht, wenn der erzeugte Strom zum Betreiben von Pumpen und das Brauchwasser zur Kühlung der PV-Anlage (und somit Erhöhung deren Wirkungsgrades) genutzt wird. Zur Bestätigung dieser Hypothese ist jedoch eine tiefere Untersuchung dieses Ansatzes erforderlich.

Die Ansprüche an die Wasserqualität für verschiedene Einsatzbereiche ist ein sehr komplexes Thema, das in der Arbeit nur geringfügig angesprochen wurde. Angenommen wurde, dass die geplanten, marktüblichen Systeme immer die erforderlichen Normen und Standards erfüllen und somit eine geeignete Wasserqualität für eine bestimmte Nutzung gewährleisten. Diese Thematik hat jedoch für eine hygienisch unbedenkliche Planung des Systems höchste Priorität und sollte, möglicherweise in einer separaten Arbeit, gründlich untersucht werden.

# QUELLENVERZEICHNIS

---

- [1] K. Adeyeye, *Water Efficiency in Buildings Theory and Practice*, 1. Aufl., Bd. 1, 1 Bde. UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [2] V. Quaschnig, *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*, 2., Bd. 1, 1 Bde. München: Carl Hanser Verlag, 2010.
- [3] „The global climate 2011-2015: heat records and high impact weather“, *World Meteorological Organization*, 03-Nov-2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/global-climate-2011-2015-hot-and-wild>. [Zugegriffen: 29-März-2017].
- [4] „WMO Statement on the State of the Global Climate in 2016“, World Meteorological Organization, WMO WMO-No. 1189, 2017.
- [5] C. Tortajada und C. N. Ong, „Reused water policies for potable use“, *Int. J. Water Resour. Dev.*, Bd. 32, Nr. 4, S. 500–502, Juli 2016.
- [6] „Aqueduct Water Risk Atlas | World Resources Institute“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.wri.org/resources/maps/aqueduct-water-risk-atlas>. [Zugegriffen: 31-März-2017].
- [7] „Aqueduct | Water Risk“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.wri.org/applications/maps/aqueduct-atlas/#x=10.29&y=2.48&s=ws!20!28!c&t=waterrisk&w=def&g=0&i=BWS-16!WSV-4!SV-2!HFO-4!DRO-4!STOR-8!GW-8!WRI-4!ECOS-2!MC-4!WCG-8!ECO-2!&tr=ind-1!prj-1&l=2&b=terrain&m=group&init=y>. [Zugegriffen: 31-März-2017].
- [8] E. by: Saeid Eslamian, *URBAN WATER REUSE H A N D B O O K*, 1. Aufl. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016.
- [9] „Buildings | Resource Efficiency“. [Online]. Verfügbar unter: <http://web.unep.org/resourceefficiency/buildings>. [Zugegriffen: 03-Apr-2017].
- [10] T. C. Maude Barlow, *BLAUES GOLD*, 2. Aufl. München: Antje Kunstmann GmbH, 2003.
- [11] „WASTEWATER THE UNTAPPED RESOURCE“, UNESCO - UN-Water, Paris, 2017.
- [12] „World Urbanization Prospects [highlights], 2014 Revision“. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2014.
- [13] „World Population Prospects The 2015 Revision Key Findings and Advance Tables“, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015), Working Paper No. ESA/P/WP.241.
- [14] F. Pearce, *When the rivers run dry*. Berkshire: Cox&Wyman Ltd, 2007.

- [15]„Reusing and recycling water“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.epa.vic.gov.au/your-environment/water/reusing-and-recycling-water>. [zugegriffen: 07-Apr-2017].
- [16]„UN-Water: News details“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.unwater.org/news-events/news-details/pt/c/212492/>. [Zugegriffen: 03-Apr-2017].
- [17]„GWP Celebrates World Water Day 2017“, *Global Water Partnership*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gwp.org/en/About/more/news/2017/gwp-celebrates-world-water-day-2017/>. [zugegriffen: 09-Apr-2017].
- [18]„Global Water Partnership - GWP“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gwp.org/en/>. [Zugegriffen: 09-Apr-2017].
- [19]Woods-Ballard, B, Kellagher, R, Martin, P, Jefferies, C, Bray, R, Shaffer, P, *The SuDS manual*. London: CIRIA C697, 2007.
- [20]UNESCO's International Hydrological Programme (IHP), „Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas“. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2005.
- [21]F. B. B. Fachvereinigung, „Planungsgrundlagen - Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V.“, *FBB Fachvereinigung*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gebaeudegruen.info/gruen/dachbegruenung/basis-wissen-planungsgrundlagen/planungsgrundlagen/>. [zugegriffen: 21-Apr-2017].
- [22]„Urbaner Gartenbau voll im Trend und selbst am Balkon möglich“, *Nachhaltigleben.ch*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.nachhaltigleben.ch/32-garten/2284-urbaner-gartenbau-voll-im-trend-und-selbst-am-balkon-moeglich>. [Zugegriffen: 25-Apr-2017].
- [23]„The Urban Agriculture trend continues in 2017“, *MSU Extension*. [Online]. Verfügbar unter: [http://msue.anr.msu.edu/news/the\\_urban\\_agriculture\\_trend\\_continues\\_in\\_2017](http://msue.anr.msu.edu/news/the_urban_agriculture_trend_continues_in_2017). [Zugegriffen: 25-Apr-2017].
- [24]Tabassom Safikhani, Aminatuzuhariah Megat Abdullah, Dilshan Remaz Ossen, und Mohammad Baharvand, „Thermal Impacts of Vertical Greenery Systems“. *Environmental and Climate Technologies*.
- [25]S. University, „Types of Green Wall“, *Staffordshire University*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.staffs.ac.uk/research/greenwall/type>. [Zugegriffen: 15-Mai-2017].
- [26]Gabriel Pérez, Lidia Rincón, Anna Vila, Josep M. González, Luisa F. Cabeza, „Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings“, *Elsevier Ltd.*, S. 6, 2011.
- [27]Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, *Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung*. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Kommunikation, 2010.
- [28]„DWA- Regelwerk Arbeitsblatt DWA-A 138“. Apr-2005.

- [29]DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 16323“. Beuth Verlag GmbH, Juli-2014.
- [30]„EWU aqua: Grauwasser“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ewu-aqua.de/kompetenzen/grauwasser/>. [Zugegriffen: 20-Feb-2017].
- [31]„Fbr-Hinweisblatt H 201 ‚Grauwasser-Recycling‘“. Fachvereinigung Betriebs- und Regenwasser.
- [32]„Entwurf Mai 2010 - VDMA 24651 - Verfahren zur Wasserwiederverwendung Auswahlkriterien, Einsatzbereiche“. VDMA, 2010.
- [33]„DIN 19650“. DIN, Feb-1999.
- [34]„Gütegemeinschaft sachgemäße Wäschepflege e.V. | RAL Gütezeichen RAL-GZ 992“. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.waeschereien.de/de/waeschereien/guetezeichen/ral\\_992/ral\\_992.html](http://www.waeschereien.de/de/waeschereien/guetezeichen/ral_992/ral_992.html). [Zugegriffen: 03-Mai-2017].
- [35]„DIN 19645“. DEUTSCHE NORM, Juli-2016.
- [36]„TrinkwV 2001 - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv\\_2001/](https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/). [Zugegriffen: 03-Mai-2017].
- [37]„Nutzung von Grauwasser“, *TGA Fachplaner*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tga-fachplaner.de/TGA-2009-9/Nutzung-von-Grauwasser,QUIEPTI1NjU4NSZNSUQ9MTAwMjQ4.html>. [Zugegriffen: 03-Mai-2017].
- [38]P. D.-I. S. Ripperger, „Anwendungen der Mikro- und Ultrafiltration zur Wasseraufbereitung“, *Filtrieren und Separieren Journal*, Bd. 23. Jahrgang, Nr. Heft 5, S. 246–252, 2009.
- [39]„Ökobilanz Grauwasseraufbereitung“, *Roof Water-Farm*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.roofwaterfarm.com/kompakt/toolbox/oekobilanz/oekobilanz-grauwasser/>. [Zugegriffen: 05-Mai-2017].
- [40]„Evaluation of Combined Rainwater and Greywater Systems for Multiple Development Types in Mediterranean climates“, *Journal of Water Sustainability*, Bd. Volume 2, Nr. Issue 1, S. 55–77, März-2012.
- [41]„DIN 1989-1“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Apr-2002.
- [42]Olaoye, R.A, Olaniyan,O.S, „Quality of Rainwater from Different Roof Material“, *International Journal of Engineering and Technology*, Bd. Volume 2, Nr. No. 8, Aug-2012.
- [43]„WATER BENCH | BY MARS ARCHITECTS - Bench Collecting & Storing Rainwater“, *Jebiga Design & Lifestyle*, 18-Okt-2013. .

- [44]N. Cifani, „Water Bench“. [Online]. Verfügbar unter:  
<http://www.bmwguggenheimlab.org/where-is-the-lab/mumbai-lab/mumbai-lab-city-projects/water-bench>. [Zugegriffen: 18-Juni-2017].
- [45]„5 Zugabewasser für Beton | Betontechnische Daten von HeidelbergCement“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.betontechnische-daten.de/de/5-zugabewasser-fuer-beton>. [Zugegriffen: 05-Mai-2017].
- [46]T. Oy, „Recycling von Frischbeton“. [Online]. Verfügbar unter:  
<http://www.tecwill.com/de/zusatzausruestungen/recycling-von-frischbeton/>. [Zugegriffen: 05-Mai-2017].
- [47]„About Ski Dubai Snowpark“, *The Playmania*, 08-März-2016. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.theplaymania.com/skidubai/about-us>. [Zugegriffen: 24-Mai-2017].
- [48]„Kühlung durch Regenwasser“, *TGA Fachplaner*. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.tga-fachplaner.de/TGA-2011-8/Kuehlung-durch-Regenwasser,QUIEPTMyNTA4NiZNSUQ9MTAwMjQ4.html>. [Zugegriffen: 24-Mai-2017].
- [49]„Gallery of Hotel Golden Holiday in Nha Trang / Trinhvieta-Architects - 5“, *ArchDaily*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.archdaily.com/551447/hotel-golden-holiday-in-nha-trang-trinh-viet-a-architects/5424a8e3c07a80c9ea0000be-hotel-golden-holiday-in-nha-trang-trinh-viet-a-architects-photo>. [Zugegriffen: 24-Mai-2017].
- [50]„Water use data - Melbourne Water“. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.melbournewater.com.au/waterdata/wateruse/Pages/default.aspx>. [Zugegriffen: 14-März-2017].
- [51]Berlin\*, „Berliner Wasserbetriebe - Berliner Wasser - – ein Qualitätsprodukt“, *BWB*. [Online]. Verfügbar unter: </content/language1/html/17209.php>. [Zugegriffen: 09-Apr-2017].
- [52]„About Bwssb | BWSSB - Bangalore Water Supply and Sewerage Board“. [Online]. Verfügbar unter: <https://bwssb.gov.in/content/about-bwssb-2>. [Zugegriffen: 12-Mai-2017].
- [53]„City of Phoenix Water Efficiency“. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.phoenix.gov/waterservices/resourcesconservation/water-efficiency#!SourcesArea>. [Zugegriffen: 13-Mai-2017].
- [54]„Klima Melbourne: Wetter, Klimatablelle & Klimadiagramm für Melbourne“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.climate-data.org/location/764100/>. [Zugegriffen: 12-Mai-2017].
- [55]G.M. Mudd, A. Deletic, T.D. Fletcher and A. Wendelborn, „A Review of Urban Groundwater in Melbourne : Considerations for WSUD“. Institute for Sustainable Water Resources, Department of Civil Engineering Monash University, Clayton,.

- [56] „Water storage reservoirs - Melbourne Water“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.melbournewater.com.au/whatwedo/supply-water/reservoirs/Pages/water-storage-reservoirs.aspx>. [Zugegriffen: 09-Apr-2017].
- [57] „Drinking water quality - Melbourne Water“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.melbournewater.com.au/whatwedo/supply-water/Pages/Water-quality.aspx>. [Zugegriffen: 19-Juni-2017].
- [58] Melbourne Water, „Water Quality Annual Report 2015-16“, Melbourne Water, Melbourne, 2015ß16, 2016.
- [59] „- Klima Berlin - Klimadiagramme und Klimatabellen für Berlin“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.wetter.de/klima/europa/deutschland/berlin-s99000032.html>. [Zugegriffen: 12-Mai-2017].
- [60] B. Wasserbetriebe, „Berliner Wasserbetriebe - Brunnen und Wasserschutzgebiete“, *BWB*. [Online]. Verfügbar unter: </content/language1/html/961.php>. [Zugegriffen: 14-Mai-2017].
- [61] B. Wasserbetriebe, „Berliner Wasserbetriebe - Wasser im Haushalt“, *BWB*. [Online]. Verfügbar unter: </content/language1/html/523.php>. [Zugegriffen: 18-Feb-2017].
- [62] J. M. Domitille Vallée, „REVIEW OF WORLD WATER RESOURCES BY COUNTRY“, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Rome, 23, 2003.
- [63] „Klima Bangalore: Wetter, Klimatabelle & Klimadiagramm für Bangalore“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.climate-data.org/location/4562/>. [Zugegriffen: 12-Mai-2017].
- [64] GOVERNMENT OF INDIA, MINISTRY OF WATER RESOURCES, und CENTRAL GROUND WATER BOARD, Dez-2008.
- [65] Vishal K Mehta, Rimi Goswami, Eric Kemp-Benedict, Sekhar Muddu, Deepak Malghan, „Social Ecology of Domestic Water Use in Bangalore“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.indiawaterportal.org/articles>. [Zugegriffen: 19-Juni-2017].
- [66] „Klima Phoenix: Wetter, Klimatabelle & Klimadiagramm für Phoenix“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.climate-data.org/location/1468/>. [Zugegriffen: 12-Mai-2017].
- [67] „Water Services Phoenix Water Quality Reports“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.phoenix.gov:443/waterservices/waterquality/water-quality-reports>. [Zugegriffen: 19-Juni-2017].
- [68] „Residential\_Home“. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.azwater.gov/AzDWR/StatewidePlanning/Conservation2/Residential/Residential\\_Home2.htm](http://www.azwater.gov/AzDWR/StatewidePlanning/Conservation2/Residential/Residential_Home2.htm). [Zugegriffen: 15-Mai-2017].
- [69] „TechDomesticPlumbing“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.azwater.gov/AzDWR/StatewidePlanning/Conservation2/Technologies/TechDomesticPlumbing.htm>. [Zugegriffen: 15-Mai-2017].



- [70] „WHO | Water sanitation and health“, *WHO*. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/en/). [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [71] „Bangalore District Religion Data - Census 2011“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.census2011.co.in/data/religion/district/242-bangalore.html>. [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [72] UNESCO - Barbara Rose Johnston, Lisa Hiwasaki, Irene J. Klaver Ameyali, Ramos Castillo, Veronica Strang, *Water, Cultural Diversity, and Global Environmental Change*, 1. Aufl., 1 Bde. Paris, France: Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2012.
- [73] W. and catchments, „Permanent water saving rules“, *Water and catchments*, 02-Mai-2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.water.vic.gov.au/liveable-cities-and-towns/permanent-water-saving-rules>. [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [74] D. of the E. and Energy, „Water Home Page | Department of the Environment and Energy, Australian Government“, 28-Aug-2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.environment.gov.au/water>. [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [75] „WHG - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/whg\\_2009/](https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/). [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [76] „AVBWasserV - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/avbwasserv/>. [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [77] „Ministry of Water Resources, Government of India“. [Online]. Verfügbar unter: <http://wrmin.nic.in/forms/list.aspx?lid=300&Id=4>. [Zugegriffen: 11-Mai-2017].
- [78] O. US EPA, „Water Quality Standards Regulations: Arizona“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.epa.gov/wqs-tech/water-quality-standards-regulations-arizona>. [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [79] „ADEQ: Water Quality Division: Standards“. [Online]. Verfügbar unter: <http://legacy.azdeq.gov/envirom/water/standards/>. [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [80] „CWS“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.azwater.gov/AzDWR/StatewidePlanning/drought/CWS.htm>. [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [81] „Oberflächengewässer Berlins / Land Berlin“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/wasser/ogewaesser/>. [Zugegriffen: 13-Mai-2017].
- [82] „Phoenix AMA Surface Water Conditions“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.azwater.gov/AzDWR/StatewidePlanning/WaterAtlas/ActiveManagementArea/s/Streams/PhoenixAMA.htm>. [Zugegriffen: 13-Mai-2017].
- [83] „A S R I S - Atlas of Australian Soils“. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.asris.csiro.au/themes/Atlas.html#Atlas\\_Digital](http://www.asris.csiro.au/themes/Atlas.html#Atlas_Digital). [Zugegriffen: 13-Mai-2017].

- [84]„Hydrogeologie / Land Berlin“. [Online]. Verfügbar unter:  
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/wasser/hydrogeo/de/gliederung.shtml>.  
 [Zugegriffen: 13-Mai-2017].
- [85]„Soil Surveys | NRCS Arizona“. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/az/soils/surveys/>. [Zugegriffen: 13-Mai-2017].
- [86]„Klima Berlin: Wetter, Klimatabelle & Klimadiagramm für Berlin“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.climate-data.org/location/2138/>. [Zugegriffen: 12-Mai-2017].
- [87]„LEED v4 Indoor Water Use Reduction Calculator | U.S. Green Building Council“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.usgbc.org/resources/indoor-water-use-calculator>. [Zugegriffen: 17-Feb-2017].
- [88]O. US EPA, „Showerheads“. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.epa.gov/watersense/showerheads>. [Zugegriffen: 15-Mai-2017].
- [89]O. US EPA, „Bathroom Faucets“. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.epa.gov/watersense/bathroom-faucets>. [Zugegriffen: 15-Mai-2017].
- [90]L. Wilson, „How big is a house? Average house size by country“, *shrinkthatfootprint.com*. .
- [91]„33% of Indians live in less space than US prisoners - Times of India“, *The Times of India*. [Online]. Verfügbar unter: <http://timesofindia.indiatimes.com/india/33-of-Indians-live-in-less-space-than-US-prisoners/articleshow/3753189.cms>. [Zugegriffen: 14-März-2017].
- [92]Schneider, *Bautabellen für Ingenieure*, 20. Auflage. Siegen: Werner Verlag, 2012.
- [93]„Australia’s official weather forecasts & weather radar - Bureau of Meteorology“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.bom.gov.au/?ref=logo>. [Zugegriffen: 14-Mai-2017].
- [94]Sharad K. Jain, Pushpendra K. Agarwal, Vijay P. Singh, *Hydrology and Water Resources of India*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [95]N. US Department of Commerce, „PF Map: Contiguous US“. [Online]. Verfügbar unter:  
[http://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/pfds\\_map\\_cont.html](http://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/pfds_map_cont.html). [Zugegriffen: 19-Mai-2017].
- [96]„Adiabate Kühlung : Energiekonzept : Justus-von-Liebig-Schule Waldshut“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.energiesparschule.de/de/energiekonzept/kuehlung.php>. [Zugegriffen: 20-Juni-2017].
- [97]„How Much Water Does a Green Wall Need?“ [Online]. Verfügbar unter:  
<http://homeguides.sfgate.com/much-water-green-wall-need-97385.html>. [Zugegriffen: 20-Juni-2017].
- [98]„The Green Star rating scale - Green Star Overview - Green Building Council Australia (GBCA)“, *Green Building Council of Australia*. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://www.gbca.org.au/green-star/green-star-overview/the-green-star-rating-scale/>.  
[Zugegriffen: 11-Feb-2017].
- [99]AECOM Australia Pty Ltd, „Portable Water Calculator Guide“. Green Building Council of Australia (GBCA), 31-März-2014.
- [100]„Green Star Project Directory - Green Building Council Australia (GBCA)“, *Green Building Council of Australia*. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.gbca.org.au/project-directory.asp>. [Zugegriffen: 27-Jan-2017].
- [101]„Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) - Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem.html>. [Zugegriffen: 10-Feb-2017].
- [102]„Kriterien - BNB Büro- und Verwaltungsgebäude - Neubau - Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-buerogebaeude/bnb-bn-2015/kriterien-bnb-buero-und-verwaltungsgebaeude-neubau.html>. [Zugegriffen: 13-Feb-2017].
- [103]Ministry of New and Renewable Energy, Government of India, and und The Energy and Resources Institute, *National Rating System – GRIHA*, 2008. Aufl., Bd. 1. T E R I Press The Energy and Resources Institute.
- [104]GRIHA Council, „GRIHA Version 2015“. GRIHA Council and The Energy and Resources Institute, Mai-2016.
- [105]„LEED | U.S. Green Building Council“. [Online]. Verfügbar unter:  
<http://www.usgbc.org/leed>. [Zugegriffen: 27-Jan-2017].
- [106]„LEED credit library | U.S. Green Building Council“. [Online]. Verfügbar unter:  
<http://www.usgbc.org/credits>. [Zugegriffen: 26-Jan-2017].
- [107]„Weather History for Phoenix, AZ | Weather Underground“. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://www.wunderground.com/history/airport/KPHX/2000/1/1/CustomHistory.html?dayend=31&monthend=12&yearend=2000&req\\_city=&req\\_state=&req\\_statename=&reqdb.zip=&reqdb.magic=&reqdb.wmo=](https://www.wunderground.com/history/airport/KPHX/2000/1/1/CustomHistory.html?dayend=31&monthend=12&yearend=2000&req_city=&req_state=&req_statename=&reqdb.zip=&reqdb.magic=&reqdb.wmo=). [Zugegriffen: 23-Juni-2017].
- [108]O. US EPA, „Water Budget Tool“, *US EPA*, 01-Feb-2017. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.epa.gov/watersense/water-budget-tool>. [Zugegriffen: 23-Juni-2017].
- [109]„Strompreis kWh - Was kostet eine Kilowattstunde?“ [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.strompreise.de/strompreis-kwh/>. [Zugegriffen: 18-Feb-2017].
- [110]Stromvergleich, „Durchschnittlicher Stromverbrauch in Deutschland“, *Stromvergleich.de*. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.stromvergleich.de/durchschnittlicher-stromverbrauch>. [Zugegriffen: 18-Feb-2017].
- [111]B. Wasserbetriebe, „Berliner Wasserbetriebe - Tarifübersicht“, *BWB*. [Online]. Verfügbar unter: </content/language1/html/204.php>. [Zugegriffen: 18-Feb-2017].

- [112] „Nationaler Klimareport 2016 Klima – Gestern, heute und in der Zukunft“, Deutscher Wetterdienst, 2016.
- [113] S. E. Water und S. E. Water, „Prices and charges“. [Online]. Verfügbar unter: <http://southeastwater.com.au/Residential/Pages/WaterPricesCharges.aspx>. [Zugegriffen: 24-Juni-2017].
- [114] „Water Services Water and Sewer Rates and Charges“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.phoenix.gov:443/waterservices/customerservices/rateinfo>. [Zugegriffen: 24-Juni-2017].
- [115] „WHO | What is the minimum quantity of water needed?“, *WHO*. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/emergencies/qa/emergencies\\_qa5/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/emergencies/qa/emergencies_qa5/en/). [Zugegriffen: 24-Juni-2017].
- [116] corporateName=UB Spatial, „Visualising Victorias Groundwater - Portal Map“. [Online]. Verfügbar unter: <http://maps.cerdi.com.au/vvg.php?agreement=Agree+and+Continue>. [Zugegriffen: 19-Juni-2017].
- [117] „Water Quality Testing Reports Bangalore“. [Online]. Verfügbar unter: <http://115.124.122.198/WQMS/ConsolidatedReport.aspx>. [Zugegriffen: 19-Juni-2017].
- [118] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN 1986-100“. 2016.

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Steigerung der mittleren Jahrestemperatur ( im °C) im Vergleich zur Referenzzeitraum 1961-1990, [5].....	9
Abbildung 2: Wasserknappheit in der Welt, World Resources Institute, Stand für Jahr 2014, [9].....	10
Abbildung 3: Wasserknappheit – Szenario für das Jahr 2030 auf der Grundlage von Erkenntnisse des 5. Sachstandsberichtes der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), [9].....	10
Abbildung 4: Natürlicher hydrologischer Wasserzyklus, [10, S. 203].....	14
Abbildung 5: Wasserschutzhierarchie für alternative Wasserquellen, [16].....	14
Abbildung 6: Hierarchie für die Nutzung alternativen Wasserquellen, [16].....	16
Abbildung 7: Einfluss der Urbanisierung auf natürlicher hydrologischer Zyklus,[10, S. 793].....	17
Abbildung 8: Eine funktionale Aufbau des Gründaches auf dem Beispiel eines Warmdaches,[22].....	19
Abbildung 9: Aufbau von Begrünte Fassade (links) und Living Walls (rechts), [25, S. 2].....	20
Abbildung 10: Einfluss der Fassadenbegrünung auf durchschnittliche Raumtemperatur, Ergebnisse der Messung in dem Zeitraum 26.05.2013-19.06.2013 in Malaysia.....	21
Abbildung 11: Ein Beispiel für Vegetationsstreifen, [10, S. 798].....	23
Abbildung 12: Beispielaufbau eines Rigolenversickerungs, [10, S. 796].....	26
Abbildung 13: Konzept Regenwassernutzung mit unterirdischen Zisterne, [10, S. 540].....	35
Abbildung 14: Wasserbank - ein Prototyp entworfen durch MARS Architekten, [44].....	37
Abbildung 15: Schematische Funktionsweise der Wasserbank, [45].....	37
Abbildung 16: Hotel Golden Holiday in Nha Trang, lebende Balkone, [50].....	43
Abbildung 17: Banco Catalana, Barcelona, Fassadenbegrünung, aufgenommen am 22.04.2013.....	43
Abbildung 18: Unidad Médica Cecimin, Bogota, Kolumbien, lebende Fassade, aufgenommen am 06.12.2016.....	43
Abbildung 19: Das Prinzip der adiabaten Abluftkühlung in Klimaanlage, [28, S. 55].....	44
Abbildung 20: Durchschnittlicher Wasserverbrauch pro Person und Aktivität im Sommer und im Winter, Melbourne, Australien, [59, S. 16].....	47
Abbildung 21: Wasser im Haushalt, durchschnittlicher Verbrauch pro Aktivität, Berlin, Deutschland, [62].....	48
Abbildung 22: Wasserverbrauch in Liter pro Person in einer Haushalt in Bangalore, Indien, [65].....	50
Abbildung 23: Wasserverbrauch in Liter pro Person in einer Haushalt in Phoenix, USA, [69], [70].....	51
Abbildung 24: Masterplan – Ausgangsentwurf, o. M. ....	60
Abbildung 25: Masterplan – Ausgangsentwurf - Kellergeschoss, o. M.....	60
Abbildung 26: Hierarchie der Grauwassernutzung.....	62
Abbildung 27: Bereiche für die dezentralen Versickerungsanlagen.....	68
Abbildung 28: Versickerungskonzept – Melbourne, Australien.....	72
Abbildung 29: Versickerungskonzept – Berlin, Deutschland.....	74
Abbildung 30: Versickerungskonzept – Bangalore, Indien.....	76
Abbildung 31: Versickerungskonzept – Phoenix, USA.....	77
Abbildung 32: Konzept der Verdunstkühlung mittels Gestaltung in Bangalore, Indien - Schnitt, o. M.....	82

Abbildung 33: Konzept der Verdunstkühlung mittels Gestaltung in Bangalore, Indien - Grundriss, o. M. ....	82
Abbildung 34: Durchschnittliche Verdunstung und Wasserbedarf der Fassadenbegrünung, [28, S. 36].....	84
Abbildung 35: Nutzungskonzept für die alternativen Wasserquellen in dem Wohngebäude .....	88
Abbildung 36: Nutzungskonzept für alternative Wasserquellen in dem Einkaufszentrum .....	89
Abbildung 37: Nutzungskonzept für alternative Wasserquellen in dem Bürogebäude .....	89

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: qualitative Bewertung des Grauwassers, Beispiel: Deutschland [32] .....	29
Tabelle 2: Der Einfluss des Dachmaterials auf der Wasserqualität, [43] .....	34
Tabelle 3: Zusammenstellung der hydrogeologischen Grunddaten für die gewählten Regionen .....	55
Tabelle 4: Übersicht der klimatischen Grundlagen für die gewählte Standorte, Quelle: www.climate-data.org [55], [64], [67], [87].....	56
Tabelle 5: Abschätzung des Bedarfes auf Grundlage der voraussichtlichen Ausstattung und aktuellen Verbrauchsmustern .....	57
Tabelle 6: Planungsgrundlage für die nachhaltigen Konzepte basierend auf der Standortanalyse .....	58
Tabelle 7: Flächenverteilung der Außenanlagen.....	59
Tabelle 8: Flächenverteilung der Bebauung.....	59
Tabelle 9: Berechnung der voraussichtlichen Nutzeranzahl pro Gebäude .....	63
Tabelle 10: Dimensionierung des Grauwassersystems für den Wohnhaus 1-3 und den Bürogebäuden .....	64
Tabelle 11: Grundlagen der Planung von Versickerungsanlagen .....	66
Tabelle 12: Berechnung der undurchlässigen Flächen ( <b>Au</b> ) .....	67
Tabelle 13: Nachweis der Flächenversickerungsfähigkeit .....	69
Tabelle 14: Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung der Außenanlagen für jeweilige Bereiche und Städte... 69	69
Tabelle 15: Berechnung der jährliche Regenwasserertrag .....	78
Tabelle 16: Dimensionierung des Regenwasserverbrauches für adiabate Kühlung.....	80
Tabelle 17: Begrünungskonzepte .....	83
Tabelle 18: Verteilung der Fassadenbegrünung .....	85
Tabelle 19: Zusammenfassung der Brauchwasserverbrauch und Dimensionierung der erforderlichen Speicher . 86	86
Tabelle 20: Die Bewertung des Bürogebäudes - Green Star - Design and As Built, [99].....	93
Tabelle 21: Bewertung Bürogebäude – BNB Büro- und Verwaltungsgebäude, [103] .....	94
Tabelle 22: Bewertung Bürogebäude – GRIHA V – 2015, [105].....	95
Tabelle 23: Bewertung Bürogebäude – LEED v4 Building Design and Construction, [107].....	96
Tabelle 24: Einsparungspotential aufgrund der Nutzung vom Regen- und Grauwasser im Bürogebäude .....	100



# ANHANGSVERZEICHNIS

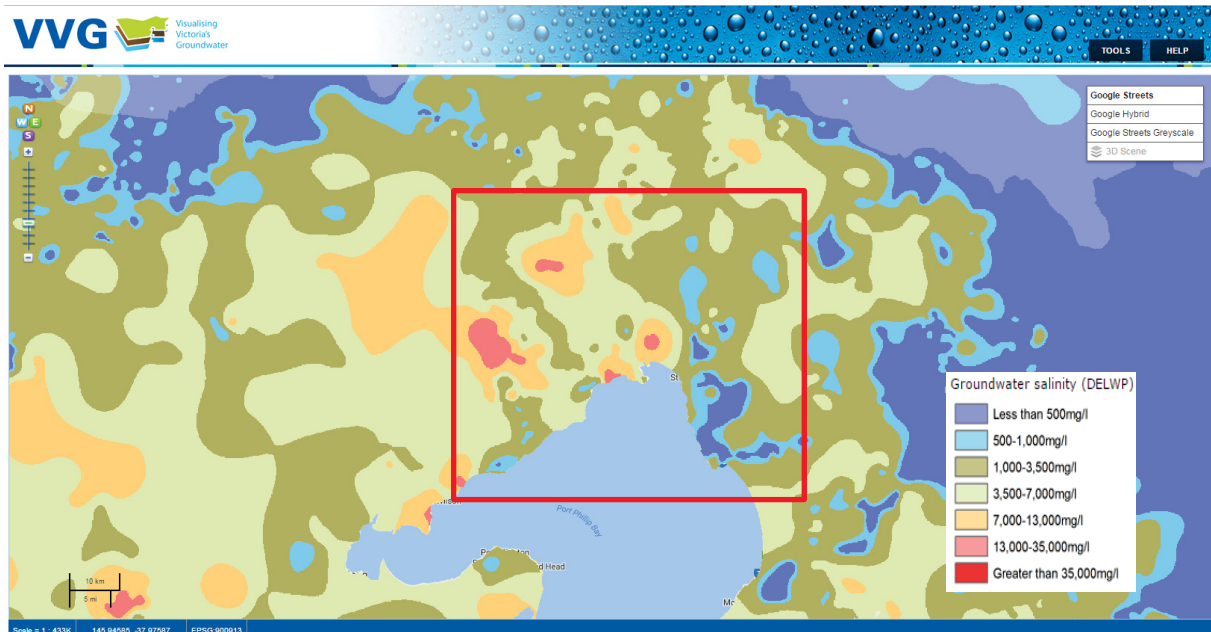
---

Anhang 1: Salzgehalt in Grundwasser, Melbourne Australien .....	118
Anhang 2: Qualität des Trinkwassers, Melbourne Australien.....	119
Anhang 3: Qualität der Berliner Wasser .....	121
Anhang 4: Qualität des Trinkwassers in Bangalore, Indien .....	122
Anhang 5: Qualität des Trinkwassers in Phoenix, USA.....	123
Anhang 6: Dimensionierung des erforderlichen Grauwasserspeichers .....	124
Anhang 7: Durchlässigkeit des Untergrundes .....	126
Anhang 8: Regenspende .....	127
Anhang 9: Empfohlene mittlere Abflussbeiwerte.....	131
Anhang 10: Zuschlagsfaktor <b>f<sub>z</sub></b> .....	131
Anhang 11: historische Klimadaten.....	132
Anhang 12: Berechnung der Fassadenbegrünung.....	133
Anhang 13: Green Star - Australien .....	134
Anhang 14: GRIHA - Indien .....	135

# ANHANG

## ANHANG 1: SALZGEHALT IN GRUNDWASSER, MELBOURNE AUSTRALIEN

Der Salzgehalt in der Grundwasser in Melbourne, Victoria State, Australien, [116]



## ANHANG 2: QUALITÄT DES TRINKWASSERS, MELBOURNE AUSTRALIEN

Typische Analyse des Trinkwassers zwischen Juli 2011 und Juni 2016, Melbourne Australien, [57]

Parameter / Source	Units	Cardinia	Greenvale	Silvan	Winneke	Tarago	Yan Yean
pH	units	7.2 - 7.7	7.2 - 8.8	7.0 - 7.7	7.0 - 7.5	6.7 - 7.5	7.3 - 9.4
Colour	Pt/Co	7	6	13	20	51	13
Turbidity	NTU	0.6 - 1.8	0.7 - 2.5	0.55 - 1.3	0.45 - 5.5	1.1 - 6.5	0.7 - 3.7
Specific Conductance	uS/cm	45 - 57	59 - 81	38 - 52	74 - 120	100 - 120	170 - 260
Iron	mg/L	0.06	0.08	0.07	0.16	0.52	0.13
Manganese	mg/L	0.003	0.003	0.005	0.006	0.039	0.007
Fluoride	mg/L	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
Aluminium (Acid Soluble)	mg/L	0.02	0.03	0.04	0.3	0.04	0.02
Arsenic	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Boron	mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Bromide	mg/l	<0.05	-	<0.05	-	-	-
Cadmium	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Calcium	mg/L	4.4	4.3	3.8	2.3	13.7	8.1
Chloride	mg/L	7.1	9.4	6.9	16.8	22.3	21.5
Chromium	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Copper	mg/L	<0.001	0.02	0.16	<0.001	<0.001	0.01
Cyanide	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Haloacetic acids							
- Chloroacetic acid	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
- Dichloroacetic acid	mg/L	0.007	0.004	0.03	0.008	0.008	0.001
- Trichloroacetic acid	mg/L	0.007	0.005	0.02	0.007	0.007	0.006
Hardness	mg/L	16	17	14.25	45	18	31
Lead	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Magnesium	mg/L	1.4	1.6	1.2	2.6	2.6	2.6
Mercury	mg/L	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Nickel	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Nitrate (N)	mg/L	7.4	0.13	0.23	0.38	0.32	0.05
Potassium	mg/L	0.7	0.8	0.7	1.4	2.3	1.4
Selenium	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Silica as SiO <sub>2</sub>	mg/L	4.5	5.4	5.9	3.7	8.4	2.2
Sodium	mg/L	4.7	5.6	4.5	10	13	10.9
Sulphate	mg/L	0.4	0.7	<2	11.3	16	13.25
Total Alkalinity (as CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	11.6	11.2	9.3	9.4	15.3	12.5
Total Organic Carbon	mg/L	2.2	2.0	2.1	3.2	5.4	6.4
Total Phosphorus	mg/L	0.007	0.007	0.007	0.008	0.004	0.009
Total Dissolved Solids	mg/L	39	42	34	20	69	82
Total Trihalomethanes	mg/L	0.032	0.018	0.022	<0.001	<0.001	0.046
Zinc	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

**Behandlungsprozesse an jeder Wasseraufbereitungsanlage, Melbourne, Australien, [58, S. 16]**

	Brahams Road	Cardinia 1400 Cardinia 1700	Cresswell	Desalination	Frogley	Greenvale St Albans Greenvale Yuroke	Kallista	Lusatia Park	Lyrebird Ave	Martyr Road	Monbulk	Silvan-Waverley Silvan-Olinda Silvan-Preston	Tarago	Winneke	Yarra Glen	Yarra Junction	Yan Yean
Filtration	Coagulation / flocculation		✓	✓	✓								✓	✓	✓		✓
	Clarification													✓			
	Rapid gravity media													✓			✓
	Dissolved air flotation filtration (DAFF)												✓				
	Membrane			✓		✓										✓	
	Drum screens, dual media pressure filters, cartridge filters				✓												
Disinfection	Chlorination	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ultraviolet (UV) irradiation	✓						✓	✓	✓			✓			✓	
	Chloramination						✓										
Other	Reverse osmosis			✓													
	Fluoridation		✓		✓						✓	✓	✓	✓			✓
	pH correction		✓	✓		✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓		✓
	Remineralisation				✓												
	Membrane preservation				✓												
	Sludge thickening / dewatering				✓								✓	✓			
	Iron / manganese removal												✓				
	Odour removal												✓				

## ANHANG 3: QUALITÄT DER BERLINER WASSER

Die Qualität der Berliner Wasser im Vergleich zu Anforderungen der TrinkwV auf Bsp. Berlin, Spandau, [51]

			Spandau
Parameter	Maßeinheit Unit	Grenzwert Limit value	Messwerte Measured value
Anorganische Spurenelemente   Anorganic trace elements			
Aluminium   Aluminium	mg/l	0,2	<0,01
Antimon   Antimony	mg/l	0,005	<0,0005
Arsen   Arsenic	mg/l	0,01	0,0004
Blei   Lead	mg/l	0,01	<0,005
Bor   Boron	mg/l	1	0,04
Cadmium   Cadmium	mg/l	0,003	<0,0005
Chrom   Chromium	mg/l	0,05	<0,001
Kupfer   Copper	mg/l	2	<0,005
Nickel   Nickel	mg/l	0,02	<0,003
Quecksilber   Mercury	mg/l	0,001	<0,0001
Selen   Selenium	mg/l	0,01	<0,001
Uran   Uranium	mg/l	0,01	<0,003
Allgemeine Parameter   General parameter			
Temperatur   Temperature	C°	-	12,4
Elektrische Leitfähigkeit   Conductivity	µS/cm	2790 bei 25°C	630
pH-Wert   Hydrogen ion concentration		6,5 - 9,5	7,6
Färbung (SAK 436nm)   Colour (436 nm)	m <sup>-1</sup>	0,5	0,27
Trübung   Turbidity	NTU	1,0	<0,20
Gesamthärte   Total hardness	°dH	-	14,6
Karbonathärte   Carbonate hardness	°dH	-	11,2
Härtebereich   Hardness interval		-	hart
Organisch gebundener Kohlenstoff (TOC) Total organic carbon	mg/l	Ohne anormale Veränderung   No abnormal change	5
Sauerstoff   Oxygen	mg/l	-	9
Kationen   Cations			
Ammonium   Ammonium	mg/l	0,5	<0,05
Calcium   Calcium	mg/l	-	92
Eisen   Iron	mg/l	0,2	<0,03
Kalium   Potassium	mg/l	-	3,2
Magnesium   Magnesium	mg/l	-	7,7
Mangan   Manganese	mg/l	0,05	<0,005
Natrium   Sodium	mg/l	200	25
Anionen   Anions			
Chlorid   Chloride	mg/l	250	38
Cyanid   Cyanide	mg/l	0,05	<0,003
Fluorid   Fluoride	mg/l	1,5	0,24
Nitrat   Nitrate	mg/l	50	1,1
Nitrit   Nitrite	mg/l	0,1	<0,03
Sulfat   Sulphate	mg/l	250	66

# ANHANG 4: QUALITÄT DES TRINKWASSERS IN BANGALORE, INDIEN

Die Qualität des Trinkwassers in Bangalore Indien auf Bsp. Werten aus April 2017, Laboratorium im Bannappa Park, [117]

Date	Division:	Sub		Service		Bannappa		Result
		CENTRAL	Division:	CENTRAL -1	Station:	Park		
	Sampling Point	pH	Turbidity, NTU	Dissolved Solids, mg/L	Chlorine, ppm	MPN/100mL	E.coli/100mL	
05/04/2016	14th Cross, Cubbonpete, P.T.	7.52	1.5	176	0.2	0	-	SPP
05/04/2016	13th Cross, Cubbonpete, P.T.	7.54	1.8	174	0.2	0	-	SPP
05/04/2016	Sherkhan Galli, No.10.	7.51	1.9	176	0.2	0	-	SPP
13/04/2016	No.24/1, Kempanna Galli.	7.49	1.6	180	0.2	0	-	SPP
13/04/2016	P.T, J.M.Road, NearSBM Bank.	7.56	1.7	176	0.2	0	-	SPP
26/04/2017	P.T, M.S.Main, Near Umashankar House.	7.59	1.8	181	0.2	0	-	SPP
26/04/2017	Jayamma, No.88/1, 3rd Cross, Cubbonpete, R.R.No.305707.	7.52	1.3	159	0.2	0	-	SPP
26/04/2017	No.15/9, J.M.Road, R.R.No.306327.	7.51	1.7	161	0.2	0	-	SPP
26/04/2017	No.6, 4th Cross, Cubbonpete, R.R.No.352128.	7.54	1.4	157	0.2	0	-	SPP
12/04/2017	No.9/1, 24th Cross, Cubbonpete, R.R.No.305904.	7.55	1.6	162	0.2	0	-	SPP
12/04/2017	Rajashekar, No.12/2, Ganigara Galli, R.R.No.S-1525-C9-312.	7.68	1.6	158	0.8	0	-	SPP
18/04/2017	Mrunthunjaya, No.957/2, Sherekhan Galli, R.R.No.48894-C7-205.	7.64	1.7	156	0.8	0	-	SPP
18/04/2017	No.3, Appajirao Lane, R.R.No.50806/C1M1-298.	7.65	1.4	157	0.4	0	-	SPP
18/04/2017	No.34, Chawdeshwari Temple Street, R.R.No.29747/C1M1/307.	7.67	1.5	156	0.4	0	-	SPP
18/04/2017	No.43, Chawdeshwari Temple Street, R.R.No.6418/C1M1/330.	7.63	1.2	153	0.4	0	-	SPP
06/04/2017	No.8, Pillappa Lane, R.R.No.6506/C1M1/360.	7.64	1.7	155	0.4	0	-	SPP
06/04/2017	Mahadev, No.33/1, Sunnakalpete Road, R.R.No.110917/C18-16.	7.66	2.3	145	0.4	0	-	SPP
06/04/2017	Mani Ramannapete, No.35, R.R.No.000329/C-4/257.	7.67	2.5	146	0.4	0	-	SPP
06/04/2017	Chanappa, No.3, Narasimha Choies Galli, R.R.No.1277/C7-282.	7.70	2.1	147	0.4	0	-	SPP
12/04/2017	Puttaraju, No.24/3, Old Chamrajpete, R.R.No.50438/C7-76.	7.68	2.4	148	0.4	0	-	SPP
12/04/2017	No.52, Anjaneya Temple, S.Purushotham, R.R.No.49474-C4-178.	7.67	1.5	159	0.8	0	-	SPP
21/04/2016	C.Arasamma, No.54, MBT, R.R.No.37627-C6-192.	7.69	1.8	161	0.8	0	-	SPP
29/04/2016	Murgesha Mudaliar Road, No.20.	7.50	1.6	190	0.4	0	-	SPP
29/04/2016	K.R.Shettypete, Papanna Galli, P.T.	7.63	1.8	175	0.2	0	-	SPP
29/04/2016	Andanappa Lane, P.T.	7.64	1.6	172	0.2	0	-	SPP
29/04/2016	No.60, Sanjeevappa Galli.	7.62	1.9	178	0.2	0	-	SPP
29/04/2016	1st Cross, Cubbonpete, P.T.	7.65	1.4	176	0.2	0	-	SPP
13/04/2016	No.18, Honnarappa Lane, Cubbonpete.	7.69	1.8	175	0.2	0	-	SPP
13/04/2016	P.T, Basavanna Lane, J.M.Road Cross.	7.61	1.6	182	0.2	0	-	SPP
21/04/2016	No.7, Pillappa Main, OTC Road Cross.	7.60	1.5	180	0.2	0	-	SPP
21/04/2016	19th Cross, Cubbonpete, P.T.	7.51	1.5	191	0.4	0	-	SPP
21/04/2016	24th Cross, Cubbonpete, P.T.	7.53	1.3	186	0.4	0	-	SPP
21/04/2016	Anekullappa Mutt Road, No.4.	7.49	1.7	185	0.4	0	-	SPP
	Sanjeevappa Galli, 25th Cross, P.T.	7.52	1.4	192	0.4	0	-	SPP



## ANHANG 5: QUALITÄT DES TRINKWASSERS IN PHOENIX, USA

Die Qualität des Trinkwassers in Phoenix, USA auf Grundlage der Bericht aus Jahr 2016 (Desinfizierungsmittel, Ästhetische sowie Mikrobiologische Schadstoffe) [67]

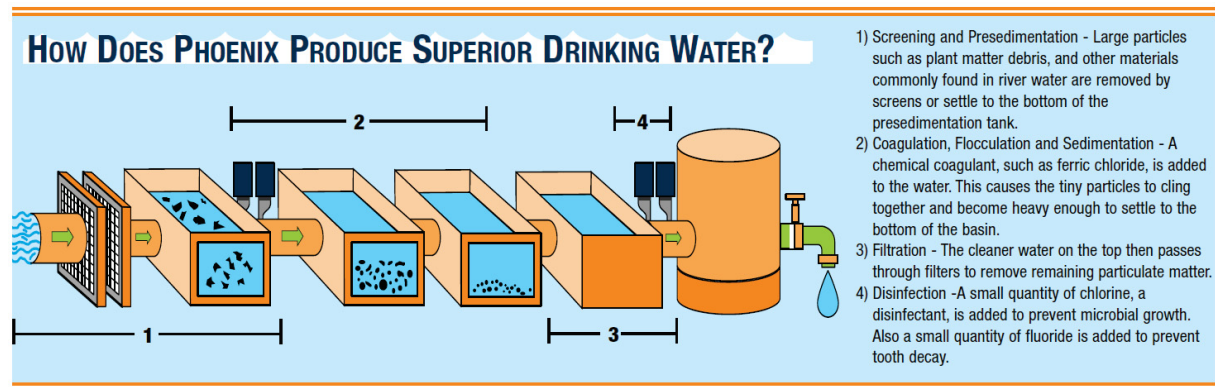
2016 Disinfectant and Disinfection Byproduct Monitoring							
Substance	Units	MCL	MCLG	Lowest Level	Highest Level	Highest Running Annual Average	Major Source in Drinking Water
Chlorine	ppm	MRDL = 4 Running Annual Average	MRDLG = 4	0.1	2.7	0.9	Water additive used to control microbes
Total Organic Carbon Removal Ratio	NA	TT = 1 or greater Running Annual Average	NA	1.0	3.2	1.5 (lowest running annual average)	Naturally present in the environment
Chlorine Dioxide	ppb	MRDL = 800	MRDLG = 800	ND	280	NA	Water additive as an oxidant
Chlorite	ppm	1	0.8	ND	0.7	0.3 (highest quarterly average)	Byproduct of drinking water treatment
Bromate	ppb	10	0	ND	ND	ND	Byproduct of drinking water treatment
Total Trihalomethanes (TTHMs)	ppb	80 Locational Running Annual Average	NA	18	71	66	Byproduct of drinking water disinfection
Haloacetic Acids (HAA)	ppb	60 Locational Running Annual Average	NA	6	20	25	Byproduct of drinking water disinfection

### 2016 Aesthetic Water Quality Analysis from Distribution System and Secondary Drinking Water Guidelines

Substance	Units	Secondary Guideline *	Lowest Detected Level	Highest Detected Level
Alkalinity	ppm	NA	98	211
Iron	ppb	300	ND	14
pH	NA	6.5 - 8.5	7.6	8.1
Sodium	ppm	NA	70	287
Temperature	°F	NA	56	96
Total Dissolved Solids (TDS)	ppm	500	372	934
Total Hardness	ppm grains/gallon	NA	204 12	306 18

2016 Microbiological Monitoring in the Distribution System				
Substance	MCL	MCLG	Highest monthly percentage of positive samples (Until March 31, 2016) <i>E. coli</i> MCL Violation (Beginning April 1, 2016)	Major Source In Drinking Water
Total Coliform Bacteria (Until March 31, 2016)	Presence in no more than 5% of monthly samples	0%	0% (zero total coliform bacteria Jan 1- March 31, 2016)	Naturally present in the environment
Total Coliform Bacteria (Beginning April 1, 2016)	TT (Level 1 or Level 2 Assessment)	NA	NA (Level 1 or Level 2 assessment not required)	Naturally present in the environment
<i>E. coli</i> Bacteria (Beginning April 1, 2016)	Routine and repeat samples are total coliform-positive and either is <i>E. coli</i> -positive or system fails to take repeat samples following <i>E. coli</i> -positive routine sample or system fails to analyze total coliform-positive repeat sample for <i>E. coli</i> .	0	No violation- zero (0) <i>E. coli</i> detected	Human or animal fecal waste

**Die Behandlungstufen des Trinkwassers in Phoenix, USA auf Grundlage der Bericht aus Jahr 2016 [67]**



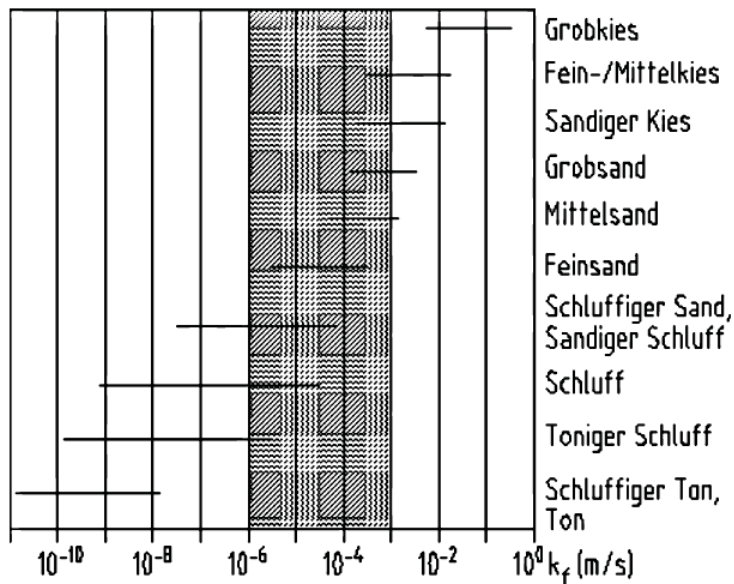
**ANHANG 6: DIMENSIONIERUNG DES ERFORDERLICHEN GRAUWASSERSPEICHERS**

	Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA	
Wohnhaus 1: tägliche Verbrauchs und Bedarfswerte	GW-Verfügbarkeit aus Körperhygiene in m <sup>3</sup>	70 l/Pers × 50 Pers = <b>3,50 m<sup>3</sup></b>	46 l/Pers × 80 Pers = <b>3,70 m<sup>3</sup></b>	20 l/Pers × 380 Pers = <b>7,60 m<sup>3</sup></b>	40 l/Pers × 60 Pers = <b>2,40 m<sup>3</sup></b>
	GW-Verfügbarkeit aus Waschmaschinen in m <sup>3</sup>	15 l/Pers × 50 Pers = <b>0,75 m<sup>3</sup></b>	15 l/Pers × 80 Pers = <b>1,20 m<sup>3</sup></b>	15 l/Pers × 380 Pers = <b>5,70 m<sup>3</sup></b>	15 l/Pers × 60 Pers = <b>0,90 m<sup>3</sup></b>
	GW-Speicher für Waschmaschinen in m <sup>3</sup>	0,75 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,60 m<sup>3</sup></b>	1,20 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,90 m<sup>3</sup></b>	5,70 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>4,30 m<sup>3</sup></b>	0,90 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,70 m<sup>3</sup></b>
	GW-Bedarf für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	7,5 l/Pers × 50 Pers = <b>0,38 m<sup>3</sup></b>	7,5 l/Pers × 80 Pers = <b>0,60 m<sup>3</sup></b>	7,5 l/Pers × 380 Pers = <b>2,85 m<sup>3</sup></b>	7,5 l/Pers × 60 Pers = <b>0,45 m<sup>3</sup></b>
	GW-Speicher für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	0,38 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,30 m<sup>3</sup></b>	0,60 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,50 m<sup>3</sup></b>	2,85 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>2,20 m<sup>3</sup></b>	0,45 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,40 m<sup>3</sup></b>
	GW-Überschuss in m <sup>3</sup>	3,50 - (0,60 - 0,30) ≈ <b>3,20 m<sup>3</sup></b>	3,70 - (0,90 - 0,50) ≈ <b>3,20 m<sup>3</sup></b>	7,60 - (4,30 - 2,20) ≈ <b>5,50 m<sup>3</sup></b>	2,40 - (0,70 - 0,40) ≈ <b>2,10 m<sup>3</sup></b>

		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Wohnhaus 2: tägliche Verbrauchs und Bedarfswerte	GW-Verfügbarkeit aus Körperhygiene in m <sup>3</sup>	70 lPers × 40 Pers = <b>2,80 m<sup>3</sup></b>	46 lPers × 70 Pers = <b>3,20 m<sup>3</sup></b>	20 lPers × 330 Pers = <b>6,60 m<sup>3</sup></b>	40 lPers × 50 Pers = <b>2,00 m<sup>3</sup></b>
	GW-Verfügbarkeit aus Waschmaschinen in m <sup>3</sup>	15 lPers × 40 Pers = <b>0,60 m<sup>3</sup></b>	15 lPers × 70 Pers = <b>1,05 m<sup>3</sup></b>	15 lPers × 330 Pers = <b>4,95 m<sup>3</sup></b>	15 lPers × 50 Pers = <b>0,75 m<sup>3</sup></b>
	GW-Speicher für Waschmaschinen in m <sup>3</sup>	0,60 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,50 m<sup>3</sup></b>	1,05 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,80 m<sup>3</sup></b>	4,95 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>3,70 m<sup>3</sup></b>	0,75 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,60 m<sup>3</sup></b>
	GW-Bedarf für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	7,5 lPers × 40 Pers = <b>0,30 m<sup>3</sup></b>	7,5 lPers × 70 Pers = <b>0,53 m<sup>3</sup></b>	7,5 lPers × 330 Pers = <b>2,48 m<sup>3</sup></b>	7,5 lPers × 50 Pers = <b>0,38 m<sup>3</sup></b>
	GW-Speicher für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	0,30 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,20 m<sup>3</sup></b>	0,53 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,40 m<sup>3</sup></b>	2,48 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>1,90 m<sup>3</sup></b>	0,38 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,30 m<sup>3</sup></b>
	GW-Überschuss in m <sup>3</sup>	2,80 -(0,50 - 0,20) ≈ <b>2,50 m<sup>3</sup></b>	3,20 -(0,80 - 0,50) ≈ <b>2,90 m<sup>3</sup></b>	6,60 -(3,70 - 1,90) ≈ <b>4,80 m<sup>3</sup></b>	2,00 -(0,60 - 0,30) ≈ <b>1,70 m<sup>3</sup></b>
Wohnhaus 1: tägliche Verbrauchs und Bedarfswerte	GW-Verfügbarkeit aus Körperhygiene in m <sup>3</sup>	70 lPers × 60 Pers = <b>4,20 m<sup>3</sup></b>	46 lPers × 90 Pers = <b>4,20 m<sup>3</sup></b>	20 lPers × 430 Pers = <b>8,60 m<sup>3</sup></b>	40 lPers × 70 Pers = <b>2,80 m<sup>3</sup></b>
	GW-Verfügbarkeit aus Waschmaschinen in m <sup>3</sup>	15 lPers × 60 Pers = <b>0,90 m<sup>3</sup></b>	15 lPers × 90 Pers = <b>1,35 m<sup>3</sup></b>	15 lPers × 430 Pers = <b>6,45 m<sup>3</sup></b>	15 lPers × 70 Pers = <b>1,05 m<sup>3</sup></b>
	GW-Speicher für Waschmaschinen in m <sup>3</sup>	0,90 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,70 m<sup>3</sup></b>	1,35 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>1,00 m<sup>3</sup></b>	6,45 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>4,80 m<sup>3</sup></b>	1,05 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,80 m<sup>3</sup></b>
	GW-Bedarf für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	7,5 lPers × 60 Pers = <b>0,45 m<sup>3</sup></b>	7,5 lPers × 90 Pers = <b>0,68 m<sup>3</sup></b>	7,5 lPers × 430 Pers = <b>3,23 m<sup>3</sup></b>	7,5 lPers × 70 Pers = <b>0,53 m<sup>3</sup></b>
	GW-Speicher für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	0,45 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,3 m<sup>3</sup></b>	0,68 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,5 m<sup>3</sup></b>	3,23 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>2,4 m<sup>3</sup></b>	0,53 m <sup>3</sup> × 75 % ≈ <b>0,40 m<sup>3</sup></b>
	GW-Überschuss in m <sup>3</sup>	4,20 -(0,70 - 0,30) ≈ <b>3,80 m<sup>3</sup></b>	4,20 -(1,00 - 0,50) ≈ <b>3,70 m<sup>3</sup></b>	8,60 -(4,80 - 2,40) ≈ <b>6,00 m<sup>3</sup></b>	2,80 -(0,80 - 0,40) ≈ <b>2,40 m<sup>3</sup></b>
Bürogebäude 1-4: tägliche Verbrauchs und Bedarfswerte	GW-Verfügbarkeit aus Waschbecken in m <sup>3</sup>	3 x 0,25 Min x 6,0 lMin x 450 Pers = <b>2,03 m<sup>3</sup></b>			
	GW-Verfügbarkeit aus Duschen in m <sup>3</sup>	1 x 5 Min x 7,5 lMin x 20 % x 450 Pers = <b>3,38 m<sup>3</sup></b>			
	GW-Bedarf für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	7,5 lPers x 450 Pers = <b>3,38 m<sup>3</sup></b>			
	GW-Speicher für WC-Spülung in m <sup>3</sup>	3,38 m <sup>3</sup> x 75 % ≈ <b>2,50 m<sup>3</sup></b>			
	GW-Überschuss in m <sup>3</sup>	2,03 + 3,38 - 2,50 ≈ <b>2,90 m<sup>3</sup></b>			

## ANHANG 7: DURCHLÄSSIGKEIT DES UNTERGRUNDES

**Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte von Lockergesteinen und entwässerungstechnisch relevanter Versickerungsbereich [28, S. 15]**



**Ertragsbeiwerte für verschiedene Dachoberflächen nach DIN 1989-1 [41, S. 27]**

**Tabelle 3 – Ertragsbeiwerte**

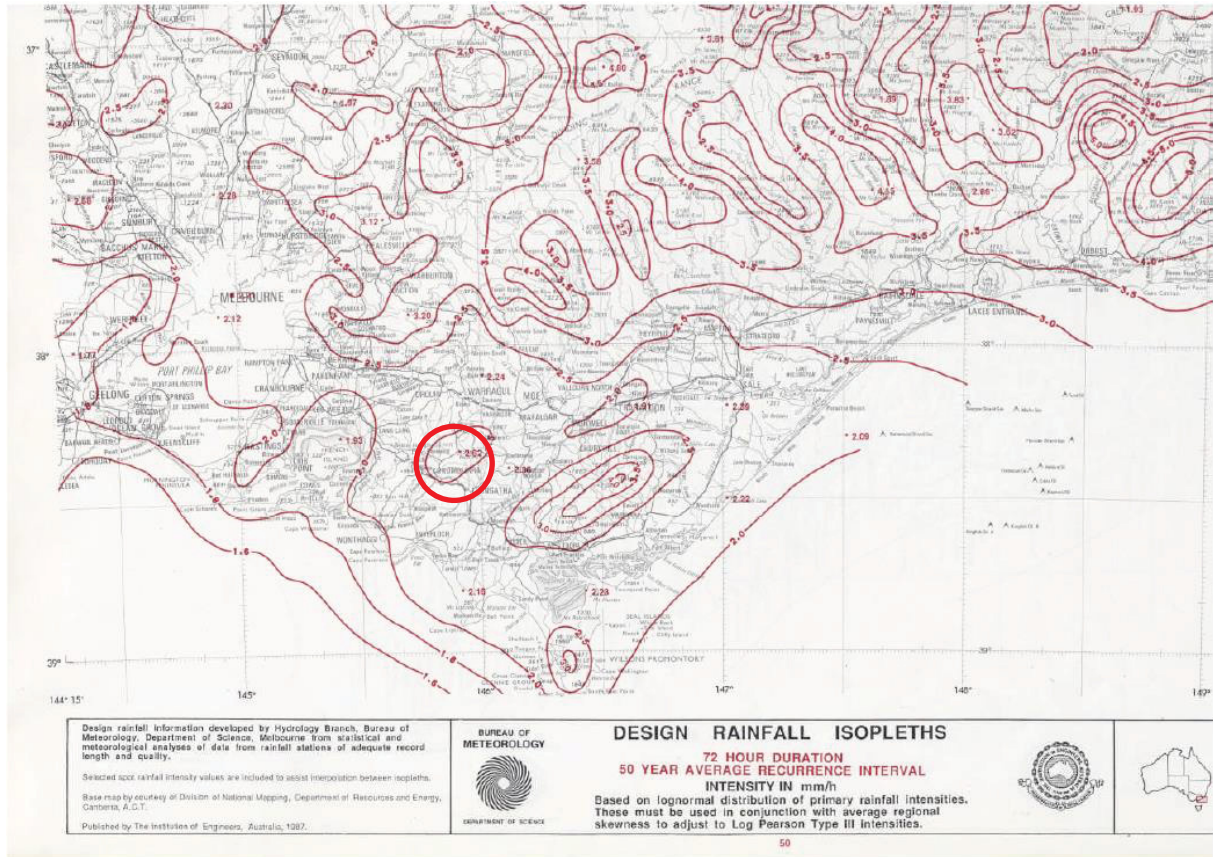
Beschaffenheit	Ertragsbeiwert % e
geneigtes Hartdach <sup>a</sup>	0,8
Flachdach unbekiest	0,8
Flachdach bekiest	0,6
Gründach intensiv	0,3
Gründach extensiv	0,5
Pflasterfläche/Verbundpflasterfläche	0,5
Asphaltbelag	0,8

<sup>a</sup> Abweichungen je nach Saugfähigkeit und Rauheit



# ANHANG 8: REGENSPENDE

Regenspende für Melbourne Australien, Quelle: Australian Bureau of Meteorology [93]



## Regenspende für Berlin Deutschland, Quelle: DIN 1986-100, Anhang A [118, S. 87]

Tabelle A.1 — Regenspenden in Deutschland<sup>5)</sup>

Ort	Dachflächen bzw. Flächen nach 14.7		Grundstücksflächen					
	Regendauer $D = 5$ min		Regendauer $D = 5$ min		Regendauer $D = 10$ min		Regendauer = 15 min	
	Bemes- sung	Notent- wässe- rung	Bemes- sung	Überflu- tungs- prüfung	Bemes- sung	Überflu- tungs- prüfung	Bemes- sung	Überflu- tungs- prüfung
	$r(5,5)$ l/(s·ha)	$r(5,100)$ l/(s·ha)	$r(5,2)$ l/(s·ha)	$r(5,30)$ l/(s·ha)	$r(10,2)$ l/(s·ha)	$r(10,30)$ l/(s·ha)	$r(15,2)$ l/(s·ha)	$r(15,30)$ l/(s·ha)
Aachen	266	463	206	384	161	290	133	241
Aschaffenburg	293	529	221	434	171	317	141	259
Augsburg	352	684	250	550	187	373	153	293
Aurich	277	506	207	414	157	297	128	240
Bad Kissingen	395	790	274	631	199	420	159	326
Bad Salzflun	339	630	250	513	188	365	153	293
Bad Tölz	444	767	345	638	258	461	209	372
Bamberg	303	527	235	437	179	320	146	260
Bayreuth	346	644	256	524	201	395	169	329
Berlin	331	582	254	481	196	359	162	296
Bielefeld	285	533	209	433	163	315	137	257
Bocholt	255	432	201	361	157	272	130	225
Bonn	285	533	209	433	163	315	137	257
Braunschweig	330	633	237	511	180	362	148	292
Bremen	246	434	189	358	149	269	125	223
Bremerhaven	314	580	232	473	170	326	137	257



**Regenspende für Bangalore Indien, Quelle: „Hydrology and water resources of India“, Seite 141 [94, S. 141]**

The intensity of storms decreases with increase in the storm duration. Further, a storm of any given duration will have a larger intensity if its return period is large. In other words, for a storm of given duration, storms of higher intensity in that duration are rarer than storms of smaller intensity. In many design problems related to watershed management, such as runoff disposal and erosion control, it is necessary to know the rainfall intensities of different durations and different return periods. The interdependency between intensity  $i$  (cm/h), duration  $D$  (hour) and return period  $T$  (years) is commonly expressed in a general form as

$$i = \frac{kT^n}{(b + t)^m} \quad (13)$$

where  $k$ ,  $b$ ,  $m$ , and  $n$  are constants for a given catchment. Typical values of these for a few places in India based on the reported studies of the Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute, Dehradun, are given in Table 23

Extreme point rainfall values of different durations and for different return periods have been evaluated by IMD and the isopluvial maps covering the entire country

Table 23. Typical values of constants in equation 13

Place	k	n	b	m
Bhopal	6.93	0.189	0.50	0.878
Nagpur	11.45	0.156	1.25	1.032
Chandigarh	5.82	0.160	0.40	0.750
Bellary	6.16	0.694	0.50	0.972
Raipur	4.68	0.139	0.15	0.928
New Delhi	5.2	0.157	0.5	1.107
Nagpur	11.5	0.156	0.25	0.990
Bhuj	3.8	0.199	0.25	0.990
Kolkata	5.9	0.115	0.15	0.924
Bangalore	6.3	0.126	0.50	1.128

Source: Mishra and Soman (2003) and Rakhecha et al. (1993).

Regenspende für Phoenix USA, Quelle: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service [95]

PDS-based point precipitation frequency estimates with 90% confidence intervals (in millimeters/hour) <sup>1</sup>										
Duration	Average recurrence interval (years)									
	1	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
5-min	57 (48-69)	75 (63-91)	103 (85-124)	124 (102-149)	151 (123-182)	173 (139-206)	195 (154-232)	218 (169-258)	247 (187-293)	270 (200-320)
10-min	44 (36-53)	57 (48-69)	78 (65-95)	94 (78-114)	115 (94-139)	132 (106-157)	148 (117-176)	166 (129-196)	188 (143-223)	206 (152-243)
15-min	36 (30-44)	47 (39-57)	65 (54-78)	78 (65-94)	95 (78-114)	109 (87-130)	123 (97-146)	137 (106-162)	156 (118-184)	170 (126-201)
30-min	24 (20-29)	32 (27-39)	43 (36-53)	52 (43-63)	64 (52-77)	73 (59-87)	83 (65-98)	92 (72-109)	105 (79-124)	114 (85-135)
60-min	15 (12-18)	20 (16-24)	27 (22-33)	32 (27-39)	40 (32-48)	45 (36-54)	51 (40-61)	57 (44-68)	65 (49-77)	71 (52-84)
2-hr	9 (7-10)	11 (9-13)	15 (13-18)	18 (15-21)	22 (18-26)	25 (20-29)	28 (23-33)	31 (25-37)	35 (28-42)	39 (30-46)
3-hr	6 (5-7)	8 (7-10)	10 (9-12)	12 (10-15)	15 (12-18)	17 (14-21)	20 (16-23)	22 (17-26)	25 (19-30)	28 (21-33)
6-hr	4 (3-5)	5 (4-6)	6 (5-7)	7 (6-9)	9 (7-10)	10 (8-12)	11 (9-13)	12 (10-15)	14 (11-17)	15 (11-18)
12-hr	2 (2-2)	3 (2-3)	3 (3-4)	4 (3-5)	5 (4-5)	5 (4-6)	6 (5-7)	6 (5-8)	7 (6-9)	8 (6-9)
24-hr	1 (1-1)	2 (1-2)	2 (2-2)	2 (2-3)	3 (2-3)	3 (3-4)	4 (3-4)	4 (3-5)	5 (4-5)	5 (4-6)
2-day	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	2 (1-2)	2 (2-2)	2 (2-2)	2 (2-3)	3 (2-3)	3 (2-3)
3-day	0 (0-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-2)	2 (1-2)	2 (2-2)	2 (2-2)
4-day	0 (0-0)	0 (0-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	2 (1-2)	2 (1-2)
7-day	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	1 (0-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)
10-day	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-1)	1 (0-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)
20-day	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)
30-day	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)
45-day	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)
60-day	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)

<sup>1</sup> Precipitation frequency (PF) estimates in this table are based on frequency analysis of partial duration series (PDS). Numbers in parenthesis are PF estimates at lower and upper bounds of the 90% confidence interval. The probability that precipitation frequency estimates (for a given duration and average recurrence interval) will be greater than the upper bound (or less than the lower bound) is 5%. Estimates at upper bounds are not checked against probable maximum precipitation (PMP) estimates and may be higher than currently valid PMP values. Please refer to NOAA Atlas 14 document for more information.

## ANHANG 9: EMPFOHLENE MITTLERE ABFLUSSBEIWERTE

Empfohlene mittlere Abflussbeiwerte  $\psi_m$  nach ATV-DVWK-A 117 und ATV-DVWK-M 153 [28, S. 21]

Tabelle 2: Empfohlene mittlere Abflussbeiwerte  $\psi_m$  nach ATV-DVWK-A 117 und ATV-DVWK-M 153

Flächentyp	Art der Befestigung	$\psi_m$
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	0,9 – 1,0
	Ziegel, Dachpappe	0,8 – 1,0
Flachdach (Neigung bis 3° oder ca. 5 %)	Metall, Glas, Faserzement	0,9 – 1,0
	Dachpappe	0,9
	Kies	0,7
Gründach (Neigung bis 15° oder ca. 25 %)	humusiert < 10 cm Aufbau	0,5
	humusiert $\geq$ 10 cm Aufbau	0,3
Straßen, Wege und Plätze (flach)	Asphalt, fugenloser Beton	0,9
	Pflaster mit dichten Fugen	0,75
	fester Kiesbelag	0,6
	Pflaster mit offenen Fugen	0,5
	lockerer Kiesbelag, Schotterrasen	0,3
	Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine	0,25
	Rasengittersteine	0,15
Böschungen, Bankette und Gräben mit Regen- abfluss in das Entwässerungssys- tem	toniger Boden	0,5
	lehmiger Sandboden	0,4
	Kies- und Sandboden	0,3
Gärten, Wiesen und Kulturland mit möglichem Regenabfluss in das Entwässerungssystem	flaches Gelände	0,0 – 0,1
	steiles Gelände	0,1 – 0,3

## ANHANG 10: ZUSCHLAGSFAKTOR $f_z$

Zuschlagsfaktor  $f_z$  nach DWA-A 117

Risikomaß	Zuschlagsfaktor $f_z$
gering	1,20
mittel	1,15
hoch	1,10

Quelle: DWA-A117

# ANHANG 11: HISTORISCHE KLIMADATEN

## Melbourne, Australien

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature (°C)	20.1	20.3	18.6	15.3	12.4	10.2	9.4	10.4	12.1	14.2	16.2	18.3
Min. Temperature (°C)	14	14.4	13	10.4	8.3	6.4	5.6	6.3	7.4	9	10.6	12.5
Max. Temperature (°C)	26.2	26.2	24.2	20.3	16.6	14	13.3	14.6	16.8	19.4	21.8	24.1
Avg. Temperature (°F)	68.2	68.5	65.5	59.5	54.3	50.4	48.9	50.7	53.8	57.6	61.2	64.9
Min. Temperature (°F)	57.2	57.9	55.4	50.7	46.9	43.5	42.1	43.3	45.3	48.2	51.1	54.5
Max. Temperature (°F)	79.2	79.2	75.6	68.5	61.9	57.2	55.9	58.3	62.2	66.9	71.2	75.4
Precipitation / Rainfall (mm)	47	44	44	54	66	46	50	58	62	71	64	60

## Berlin, Deutschland

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature (°C)	-0.9	0	3.9	8.6	13.5	16.8	18.6	18	14.4	10.4	4.4	1
Min. Temperature (°C)	-3.4	-2.9	0	3.8	8	11.3	13.4	12.7	9.5	7.5	1.9	-1.2
Max. Temperature (°C)	1.7	3	7.9	13.5	19.1	22.3	23.8	23.3	19.4	13.3	7	3.2
Avg. Temperature (°F)	30.4	32.0	39.0	47.5	56.3	62.2	65.5	64.4	57.9	50.7	39.9	33.8
Min. Temperature (°F)	25.9	26.8	32.0	38.8	46.4	52.3	56.1	54.9	49.1	45.5	35.4	29.8
Max. Temperature (°F)	35.1	37.4	46.2	56.3	66.4	72.1	74.8	73.9	66.9	55.9	44.6	37.8
Precipitation / Rainfall (mm)	43	34	35	41	54	70	57	61	44	37	45	49

## Bangalore, Indien

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature (°C)	20.8	22.9	25.5	27.1	26.9	24.4	23.3	23.4	23.2	23.1	21.8	20.7
Min. Temperature (°C)	14.3	15.7	18.3	20.6	20.7	19.4	19	19	18.5	18.5	16.8	15.1
Max. Temperature (°C)	27.4	30.1	32.8	33.7	33.1	29.4	27.7	27.8	28	27.8	26.8	26.3
Avg. Temperature (°F)	69.4	73.2	77.9	80.8	80.4	75.9	73.9	74.1	73.8	73.6	71.2	69.3
Min. Temperature (°F)	57.7	60.3	64.9	69.1	69.3	66.9	66.2	66.2	65.3	65.3	62.2	59.2
Max. Temperature (°F)	81.3	86.2	91.0	92.7	91.6	84.9	81.9	82.0	82.4	82.0	80.2	79.3
Precipitation / Rainfall (mm)	1	4	8	36	96	68	98	116	182	150	56	16

## Phoenix, USA

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature (°C)	11.4	13.6	16.1	20.1	24.8	29.7	32.7	31.7	28.6	22.5	15.7	11.6
Min. Temperature (°C)	3.6	5.3	7.5	10.7	15.1	19.9	24.7	23.8	20	13.5	7.3	3.8
Max. Temperature (°C)	19.3	22	24.7	29.5	34.5	39.6	40.8	39.7	37.2	31.5	24.2	19.5
Avg. Temperature (°F)	52.5	56.5	61.0	68.2	76.6	85.5	90.9	89.1	83.5	72.5	60.3	52.9
Min. Temperature (°F)	38.5	41.5	45.5	51.3	59.2	67.8	76.5	74.8	68.0	56.3	45.1	38.8
Max. Temperature (°F)	66.7	71.6	76.5	85.1	94.1	103.3	105.4	103.5	99.0	88.7	75.6	67.1
Precipitation / Rainfall (mm)	22	20	25	8	4	3	23	28	20	16	17	25

## ANHANG 12: BERECHNUNG DER FASSADENBEGRÜNUNG

### Die Berechnung der Flächen für lebende Wände

Spezifische Werte		Melbourne, Australien	Berlin, Deutschland	Bangalore, Indien	Phoenix, USA
Annahme: Wasserbedarf für Bewässerung der Fassadenbegrünung in mm pro Tag		10	10	10	5 (überwiegend Sukkulenten)
Verfügbare Fassadenfläche (o. Fenster) in m <sup>2</sup>	EZ	320 m * 12 m * 50 % = 1.920 m <sup>2</sup>			
	Bürogebäude	300 m * 12 m * 50 % = 1.800 m <sup>2</sup>			
	Wohnhaus 1	210 m * 12 m * 50 % = 1.260 m <sup>2</sup>			
	Wohnhaus 2	200 m * 12 m * 50 % = 1.200 m <sup>2</sup>			
	Wohnhaus 3	230 m * 12 m * 50 % = 1.380 m <sup>2</sup>			
Verfügbare Regenwasser pro Tag	EZ	1714,3/365 = 4,7 m <sup>3</sup>	1467,2/365 = 4,0 m <sup>3</sup>	2139,0/365 = 5,9 m <sup>3</sup>	543,1/365 = 1,5 m <sup>3</sup>
	Bürogebäude	712,1/365 = 2,0 m <sup>3</sup>	609,4/365 = 1,7 m <sup>3</sup>	888,5/365 = 2,4 m <sup>3</sup>	225,6/365 = 0,6 m <sup>3</sup>
	Wohnhaus 1	402,8/365 = 1,1 m <sup>3</sup>	344,7/365 = 0,9 m <sup>3</sup>	502,6/365 = 1,4 m <sup>3</sup>	127,6/365 = 0,3 m <sup>3</sup>
	Wohnhaus 2	352,4/365 = 1,0 m <sup>3</sup>	301,6/365 = 0,8 m <sup>3</sup>	439,8/365 = 1,2 m <sup>3</sup>	111,7/365 = 0,3 m <sup>3</sup>
	Wohnhaus 3	453,1/365 = 1,2 m <sup>3</sup>	387,8/365 = 1,1 m <sup>3</sup>	565,4/365 = 1,5 m <sup>3</sup>	143,6/365 = 0,4 m <sup>3</sup>
Verfügbare Bewässerungswasser pro Tag	EZ	4,7 m <sup>3</sup>	4,0 m <sup>3</sup>	5,9 m <sup>3</sup>	1,5 m <sup>3</sup>
	Bürogebäude	2,9 + 2,0 = 4,9 m <sup>3</sup>	2,9 + 1,7 = 4,6 m <sup>3</sup>	2,9 + 2,4 = 5,3 m <sup>3</sup>	2,9 + 0,6 = 3,5 m <sup>3</sup>
	Wohnhaus 1	2,9 + 1,1 = 4,0 m <sup>3</sup>	2,8 + 0,9 = 3,7 m <sup>3</sup>	3,3 + 1,4 = 4,7 m <sup>3</sup>	1,7 + 0,3 = 2,0 m <sup>3</sup>
	Wohnhaus 2	2,4 + 1,0 = 3,4 m <sup>3</sup>	2,4 + 0,8 = 3,2 m <sup>3</sup>	2,9 + 1,2 = 4,1 m <sup>3</sup>	1,4 + 0,3 = 1,7 m <sup>3</sup>
	Wohnhaus 3	3,5 + 1,2 = 4,7 m <sup>3</sup>	3,1 + 1,1 = 4,2 m <sup>3</sup>	3,8 + 1,5 = 5,3 m <sup>3</sup>	2,0 + 0,4 = 2,4 m <sup>3</sup>
Fassadenfläche die mit lebenden Wänden bedeckt sein kann	EZ	470 m <sup>2</sup>	400 m <sup>2</sup>	Nicht vorgesehen	300 m <sup>2</sup>
	Bürogebäude	490 m <sup>2</sup>	460 m <sup>2</sup>	530 m <sup>2</sup>	700 m <sup>2</sup>
	Wohnhaus 1	400 m <sup>2</sup>	370 m <sup>2</sup>	470 m <sup>2</sup>	400 m <sup>2</sup>
	Wohnhaus 2	340 m <sup>2</sup>	320 m <sup>2</sup>	410 m <sup>2</sup>	340 m <sup>2</sup>
	Wohnhaus 3	470 m <sup>2</sup>	420 m <sup>2</sup>	530 m <sup>2</sup>	480 m <sup>2</sup>

## ANHANG 13: GREEN STAR - AUSTRALIEN

Die Scorecard und die Bewertung aus der „Potable Water Calculator“ Green Star befindet sich auf der angehängten CD.

### Bewertung aus der „Ecological Value Calculator“ Green Star, [98]

Land Type	Weighting	Before			After		
		Area (m <sup>2</sup> )		Score	Area (m <sup>2</sup> )		Score
		Plan area	Green wall		Plan area	Green wall	
Hard surface	0,00	-	-	0,00	40	-	0,00
Exotic vegetation	0,05	-	-	0,00	-	-	0,00
Non-improved pastures	0,35	700	-	245,00	500	-	175,00
Planted native vegetation	0,50	2 000	-	1000,00	1 080	490	662,50
Artificial water-bodies	0,50	-	-	0,00	-	-	0,00
Regenerating native habitat (re-growth) < 5 years old	0,50	-	-	0,00	-	-	0,00
Regenerating native habitat (re-growth) 5 – 10 years old	0,75	-	-	0,00	-	-	0,00
Regenerating native habitat (re-growth) > 10 years old	0,90	-	-	0,00	-	-	0,00
Remnant native vegetation	1,00	-	-	0,00	1 080	-	1080,00
Natural water-bodies	1,00	-	-	0,00	-	-	0,00
<b>Total</b>		<b>2 700</b>	<b>-</b>	<b>1245,00</b>	<b>2 700</b>	<b>245</b>	<b>1917,50</b>
<b>Ecological Value Score</b>				<b>0,46</b>			<b>0,65</b>

Check Areas Match	WAHR
Total Change in Ecological Value	0,190
Points Achieved	2,9

Improvement in Ecological Value	Points
0,01	1
0,10	2
0,20	3

### Anforderungen der Pollution Reduction Targets, [98]

Pollutant	Reduction Target (% of the typical urban annual load).		
	A	B	C
<b>Total Suspended Solids (TSS)<sup>1</sup></b>	80%	80%	90%
<b>Gross Pollutants</b>	85%	90%	95%
<b>Total Nitrogen (TN)<sup>2</sup></b>	30%	45%	60%
<b>Total Phosphorus (TP)<sup>2</sup></b>	30%	60%	70%
<b>Total Petroleum Hydrocarbons<sup>3</sup></b>	60%	90%	90%
<b>Free Oils<sup>3</sup></b>	90%	90%	98%

Table 1 Pollution Reduction Targets.

1 Load based on the following particulate size distribution (by mass): 20% <20 µm; 20% 20-60 µm; 20% 60-150 µm; 20% 150-400 µm; 20% 400-2000 µm.

2 Load includes particulate and dissolved fraction.

3 This requirement is not applicable where the site contains less than a total of 200m<sup>2</sup> of uncovered areas where vehicles are likely to transit and/or park e.g. roads, loading docks, refuelling bays, car parking etc.



## ANHANG 14: GRIHA - INDIEN

Die Bewertungstabelle befindet sich auf der angehängten CD.

Berechnung der Wassereinsparung im Innenraum gegenüber der Baseline, [103, S. 47]

**Table 11.1** Estimation of building water use (sample calculation sheet)

Present design case				
Building occupancy	100	Working days	260	
Fixtures	No. of fixtures	Flow rates (lpf/lpm)	No. of uses (per person/day)	Water consumption (litres)
1	Water closets	6	4	
2	Kitchen faucets	7.5	3	
3	Water closets	3	4	
4	Waterless urinals	0	4	
5	Lavatory faucets	7.5	3	
Daily water consumption (litres)				
Annual water consumption (litres)				
Base case				
Building occupancy	100	Working days	260	
Fixtures	No. of fixtures	Flow rates (lpf/lpm)	No. of uses (per person/day)	Water consumption (litres)
1	Water closets	9	8	
2	Kitchen faucets	15	3	
3	Lavatory faucets	15	3	
Daily water consumption (litres)				
Annual water consumption (litres)				

lpf – litres per flush; lpm – litres per minute

Number of uses (for kitchen and lavatory faucets):

In the present design case, number of usage/person/day = 6

Duration of single usage = 0.5 minutes

Therefore, number of uses (for kitchen and lavatory faucets) =  $6 \times 0.5 = 3$

**Table 11.2** Reduction in water use (in percentage)

Water use reduction (%)	$\frac{[\text{Annual water demand (base case)} - \text{annual water demand (design case)}]}{\text{annual water demand (base case)}} \times 100$
-------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Berechnung der Wassereinsparung gegenüber der Baseline, [103, S. 45f]**

**Table 10.1** Calculation of landscape water requirement for design case (for example, Hissar, Haryana)

Plant species	Evapo-transpiration rate (m/day)	Plant factor	Canopy area (m <sup>2</sup> )	Irrigation system efficiency	Water requirement (LPD)
Lawns	0.0004	1	x	0.75	$1000 \times x \times 1 \times 0.0004 / 0.75 = 53.33$
Native	0.0004	0.4	x	0.85	$1000 \times x \times 0.4 \times 0.0004 / 0.85 = 18.82$
Newly planted	0.0004	0.7	x	0.75	$1000 \times x \times 0.7 \times 0.0004 / 0.75 = 37.33$
Trees	0.0004	0	x		$1000 \times x \times 0 = 0$

Total daily water requirement

m – metre; LPD – litres per day; x – corresponding canopy area

**Table 10.2** Calculation of landscape water requirement for base case (for example, Hissar, Haryana)

Plant species	Evapo-transpiration rate (m/day)	Plant factor	Canopy area (m <sup>2</sup> )	Irrigation system efficiency	Water requirement (LPD)
Lawns	0.0004	1	4x	0.75	$1000 \times 4x \times 1 \times 0.0004 / 0.75 = 213.33$

Total water requirement

Total daily water requirement (litres)

Total monthly water requirement (litres)

Total annual water requirement (litres)

Daily water requirement for base case (litres) =  $1000 \times \text{area of lawns (m}^2) \times 1 \times 0.002 / 0.75$

Monthly water requirement for base case (litres)

Annual water requirement for base case (litres)

Water use reduction (%) =  $[\text{Annual water demand (base case)} - \text{annual water demand (design case)}] / \text{annual water demand (base case)} \times 100$

Canopy area

Canopy area is square foot area of plant – view of the plant

a) assumed as 269 sq. ft. per tree and 162 numbers in an acre

b) assumed as area covered by shrubs and grass

Plant factor

Plant factor refers to the water requirement of plants. Plants are classified according to the resistance to stress.

LPD – litres per day; m – metre