

Fachinformation des Landesumweltamtes
(Internetpräsentation)

Nr. 8

Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg

Untersuchungen zur Durchlässigkeitsbestimmung von
MKW-kontaminiertem Lockergestein an einem ehe-
maligen WGT-Standort im Land Brandenburg



LANDESUMWELTAMT
BRANDENBURG



Die vorliegende Informationsschrift basiert auf dem Gutachten „Untersuchungen zur Durchlässigkeitsbestimmung von MKW-kontaminiertem Lockergestein...“, welches von der Freien Universität Berlin, Fachrichtung Rohstoff- und Umweltgeologie im Auftrag der Brandenburgische Bodengesellschaft für Grundstücksverwaltung und -Verwertung mbH im Jahre 1999 erarbeitet wurde.

Auftraggeber: Brandenburgische Bodengesellschaft für Grundstücksverwaltung
und -Verwertung mbH
Hauptallee 116 / 6
15838 Waldstadt

Auftragnehmer: Freie Universität Berlin
Fachrichtung Rohstoff- und Umweltgeologie
Malteserstr. 74 - 100
12249 Berlin

Prof. Dr. Asaf Pekdeger
Dipl. Geol. Tammo Meyer
Dr. Andreas Winkler

Fachinformation des Landesumweltamtes (Internetpräsentation) - Nr. 8

Herausgeber:
Landesumweltamt Brandenburg (LUA)
Abt. Technischer Umweltschutz, Ref. Altlasten – T 6
Berliner Straße 21 - 25
14467 Potsdam

Download: <http://www.mlur.brandenburg.de/info/lua-publikationen>

Endredaktion:
LUA, Referat Altlasten, Dipl. Dipl.-Ing. André Wünsch
Tel.: 0331/2776-138 (144)
Fax: 0331/2776-306
E-Mail: andre.wuensch@lua.brandenburg.de

Potsdam, im März 2005

Diese Internetpräsentation erfolgt im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbenden zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Der Bericht einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit den Meinungen des Herausgebers übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	3
1.1 Problem- und Aufgabenstellung	3
2 Durchgeführte Untersuchungen	4
2.1 Bestimmung der Durchlässigkeit (k_f -Wert Bestimmungen)	4
2.2 Untersuchungen zu Korrelationmöglichkeiten zwischen scheinbarer und wahrer Kerosinmächtigkeit	7
2.3 Säulendurchlauf- und Säulenumlaufversuche (Eluationsversuche)	9
3 Ergebnisse und Interpretation	10
3.1 Ergebnisse der Durchlässigkeitsbestimmungen	10
3.2 Ergebnisse - Untersuchungen zu Korrelationmöglichkeiten zwischen scheinbarer und wahrer Kerosinmächtigkeit	12
3.3 Ergebnisse - Säulendurchlauf- und Umlaufsäulenversuche (Eluationsversuche)	13

Anlagen

Anlage 1:	Körnungslinie - der unbehandelten und mit H_2O_2 gereinigten Sedimentprobe des zuvor unkontaminierten Liners
Anlage 2:	Körnungslinie - der unbehandelten und mit H_2O_2 gereinigten Sedimentprobe des bereits bei der Probennahme kontaminierten Liners
Anlage 3:	Entwicklung der k_f - Werte - Wasser durch unkontaminiertes Sediment -
Anlage 4:	Entwicklung der k_f - Werte - Kerosin durch kontaminiertes Sediment -
Anlage 5:	Entwicklung der k_f - Werte - Wasser wird durch Kerosin verdrängt -
Anlage 6:	Entwicklung der k_f - Werte - Kerosin wird durch Wasser verdrängt -
Anlage 7:	Verdrängungskurve (zeitliche Entwicklung) - Kerosin verdrängt Wasser, Liner (1,50 – 1,75 m) -
Anlage 8:	Verdrängungskurve (zeitliche Entwicklung) - Wasser verdrängt Kerosin, Liner (2,50 – 2,75 m) -
Anlage 9:	Entwicklung der k_f - Werte - Kerosin durch unkontaminiertes Sediment -
Anlage 10:	Entwicklung der k_f - Werte - Wasser im kontaminierten Sediment, nach der Verdrängung von Kerosin -

1. Einleitung

1.1 Problem- und Aufgabenstellung

Im Rahmen der Altlastenbearbeitung an einem ehemaligen Tanklagerstandort in Brandenburg bestand die Notwendigkeit zur Durchführung vertiefender Untersuchungen zum Verhalten von „Mineralölkohlenwasserstoff-Phase“ (MKW-Phase) in der ungesättigten/gesättigten Bodenzone (Lockergestein). Die aus dem 1999 realisierten Forschungsvorhaben ermittelten Ergebnisse haben insbesondere für das Land Brandenburg Relevanz, da von den hier erfassten altlastverdächtigen Flächen ca. 30 - 40 % durch den Eintrag von MKW verursacht wurden. Obwohl das Auftreten von Kontaminationen durch MKW einen großen Prozentsatz in der Altlastenbearbeitung ausmacht, liegen relativ wenig Erkenntnisse zum eigentlichen stoffspezifischen Verhalten im Untergrund, basierend auf zuverlässigen Daten vor. Daher ist die Aktualität der hier gewonnenen Forschungsergebnisse auch heute noch gegeben. Dieser Beitrag soll hiermit der Fachwelt zur Information und Diskussion vorgestellt werden.

Folgende Problemstellungen waren Untersuchungsgegenstand:

- I. Die *Durchlässigkeit* von Lockergesteinen lässt sich für aquatische Systeme normalerweise mit hinreichender Genauigkeit für viele Fragestellungen durch die Auswertung von Kornsummenkurven und der Ermittlung des wirksamen Korndurchmessers, z.B. nach HAZEN, berechnen. Die hieraus gewonnenen Aussagen über die Durchlässigkeit sind jedoch nicht ohne weiteres auf die mit einer „MKW-Phase“ erfüllten Lockergesteine zu übertragen.
- II. Ein weiteres Problem in der Altlastenbearbeitung bei MKW-Schadensfällen stellt die Bestimmung der „wahren“ Mächtigkeit von auf dem Grundwasser aufschwimmenden MKW-Phasenkörpern dar, welche sich aus Messungen in Grundwassermessstellen (GWMS) und Brunnen nicht ohne weiteres extrapolieren lassen.

Die Untersuchungsarbeiten zur Klärung der o.g. Fragestellungen beziehen sich auf ein ehemaliges WGT¹-Tanklager im Land Brandenburg. An diesem Standort wurde auf einer Fläche von insgesamt ca. 13 ha eine freie aufschwimmende Leichtphase von bis zu max. 0,76 m nachgewiesen. Um die hier vorliegende spezifische Schadensfallkonstellation (ca. 60 % Kerosin und 40 % Ottokraftstoff) zu berücksichtigen, wurde u.a. die Bestimmung der Korngrößenverteilung durch kombinierte Sieb- und Sedimentationsuntersuchungen an kontaminiertem und unkontaminiertem Lockergestein durchgeführt und daraus die spezifischen Permeabilitätswerte ermittelt. Mit Hilfe von Permeameterversuchen sollte weiterhin die Durchlässigkeit an quasi ungestörten und unkontaminierten Lockergesteinsproben sowie die „Kerosindurchlässigkeit²“ von kontaminiertem Lockergestein ermitteln werden.

Diesen Untersuchungen schlossen sich Verdrängungsversuche an, in denen die Durchlässigkeiten für folgende Szenarien bestimmt werden sollten:

¹ WestGruppe der sowjetischen Truppen

² Um die Lesbarkeit zu erhöhen, wird im Weiteren nur noch der Begriff „Kerosin“ (Mischkontamination: ca. 60 % Kerosin und 40 % Ottokraftstoff) verwendet.

- a) Wasser wird von Kerosin verdrängt und
- b) Kerosin wird von Wasser verdrängt.

Bei Grundwasserspiegelmessungen an Brunnen und GWMS im zu beurteilenden Schadensbereich wurde festgestellt, dass sich, die hier ermittelten „scheinbaren“ Kerosinmächtigkeiten in den GWMS/Brunnen nicht direkt auf die „wahre“ Kerosinmächtigkeit der auf dem Grundwasser aufschwimmenden Kerosinphase extrapolieren lässt. Zur Problemlösung wurde im Labormaßstab ein Versuchsbehälter konzipiert, welcher die spezifischen Standortverhältnisse wiederspiegeln sollte und entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

2 Durchgeführte Untersuchungen

2.1 Bestimmung der Durchlässigkeit (k_f -Wert Bestimmungen)

a) Versuchsdurchführung - Sieb- und Sedimentationsversuche

Die Bestimmung der Durchlässigkeiten erfolgte in einem ersten Schritt mittels Korngrößenbestimmungen durch kombinierte Sieb- und Sedimentationsversuche (DIN 18123). Die k_f -Werte wurden mittels des wirksamen Korndurchmessers (d_{10}) nach HAZEN errechnet.

b) Versuchsdurchführung mittels Durchflussapparatur - Permeameterversuche (DIN 18130)

Bei der Bestimmung der Durchlässigkeiten an quasi ungestörten Proben mittels einer Durchflussapparatur (DIN 18130, siehe Abb. 1) wurden zunächst die „reinen Systeme“ untersucht, d.h. unkontaminiertes Sediment (Linerprobe A; 1,50 - 1,75 m) wurde mit Wasser durchströmt und kontaminiertes Sediment (Linerprobe B; 2,25 – 2,50 m) mit Kerosin.

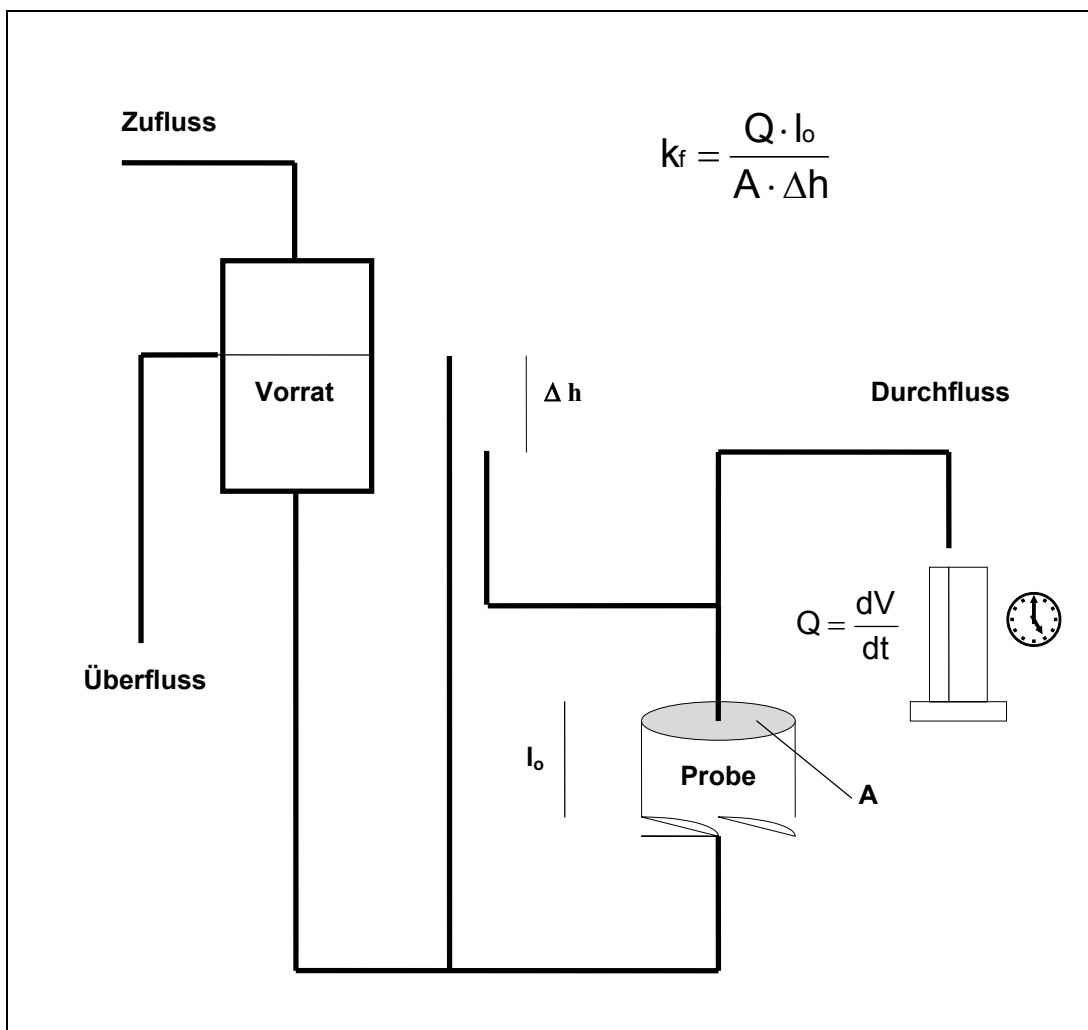


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer stationär-hydraulischen Versuchsanordnung zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes (k_f -Wert)

In die Durchflussapparatur wurden die ungestörten Linerproben (Bohrkerne ca. 25 cm) mit originaler Lagerungsdichte eingebaut und von unten nach oben mit konstantem Wasserdruck durchströmt. Die Strömungsrichtung lag dabei senkrecht zur natürlichen Lagerung der Sedimente. Danach erfolgte eine Verdrängung des Wassers durch das Kerosin. Die Durchströmungsrichtung in der Probe, welche i.d.R. von unten nach oben gerichtet ist wurde hierbei umgekehrt. Dieses spezielle Versuchsszenario war notwendig, da auf Grund der geringeren Dichte des Kerosins gegenüber Wasser, eine Verdrängung des Wassers nicht möglich gewesen wäre. Für das Versuchsszenario zur Verdrängung des Kerosins durch das Wasser konnte die übliche Durchströmungsrichtung der Probe von unten nach oben in Ansatz gebracht werden.

Da, die o.g. Versuche nicht ausschließlich mit Wasser durchgeführt wurden, muss im Weiteren zwischen dem **Durchlässigkeitsbeiwert** für Wasser k_f und der allgemein gültigen spezifischen **Permeabilität** k des Gesteins unterschieden werden.

Die *Permeabilität* (Durchlässigkeit) ist durch die spezielle geometrische Struktur des Porenraumes, z. B. die Querschnittsgröße und –form der einzelnen Fließkanäle, deren räumlichen Verlauf und gegen-

seitige Verknüpfung definiert. Sie ist eine von den Fluideigenschaften, des die Poren erfüllenden Mediums, unabhängige gesteinsspezifische Größe. Ihre Dimension wird in [m²] angegeben.

Der *Durchlässigkeitsbeiwert* ist dagegen eine Konstante, die den Widerstand (Reibung) eines von Wasser durchflossenen Gesteins beschreibt. Er hängt von den Eigenschaften des Wassers / betreffenden Fluids (z. B. Wichte, Viskosität und Temperatur) und des Grundwasserleiters (Poren und Klüfte) ab. Er ist nur bestimmbar, wenn die Reynold'sche Zahl zwischen 1 und 10 liegt. Die Dimension ist [m/s].

Die spezifischen Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f-Werte) berechnen sich entsprechend dem Darcy'schen Gesetz wie folgt:

$$k_f = \frac{Q \cdot l}{F \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (2.1 - 1)$$

k _f :	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	Δh :	Druckhöhenunterschied	[m]
Q :	Durchflussrate	[m ³ /s]	l ₀ :	Fließstrecke	[m]
F :	Filterquerschnitt	[m ²]			

Der Durchlässigkeitsbeiwert und die Permeabilität sind durch folgende Beziehungen miteinander verknüpft:

Permeabilität k:

$$k = \frac{\mu}{\gamma} * \frac{Q}{F * l} \quad [\text{m}^2] \quad (2.1 - 2)$$

Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser k_f:

$$k_f = \frac{\gamma_{\text{Wasser}}}{\mu_{\text{Wasser}}} * k \quad [\text{m/s}] \quad (2.1 - 3)$$

Der Quotient aus *Durchflussrate* Q und dem Produkt von *Filterquerschnitt* F und *Gefälle* l muss mit dem Quotienten der *dynamischen Viskosität* und der *Dichte* der Flüssigkeit multipliziert werden.

$$k_f = \frac{\gamma_{\text{Wasser}}}{\mu_{\text{Wasser}}} * \frac{\mu}{\gamma} * \frac{Q}{F * l} = \frac{Q}{F * l} \quad [\text{m/s}]$$

μ: dynamische Viskosität [kg/(s*m)] γ: Wichte [N/m³]

Da für den vorliegenden Schadensfall die Viskosität von einem extern beauftragten Labor als kinematische Viskosität (Zähigkeit) angegeben wurde, muss eine Umrechnung auf die dynamische Viskosität erfolgen. Aus der nachfolgenden Formel wird deutlich, dass die nicht mehr auf Wasser beschränkte

Durchlässigkeit k direkt proportional der dynamischen Viskosität μ ist und umgekehrt proportional zur Dichte der Flüssigkeit.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{bzw.} \quad \mu = v * \rho$$

- μ : dynamische Viskosität [kg/(s*m)]
- ρ : Dichte [kg/m³]
- γ : Wichte [N/m³]
- v : kinematische Viskosität [m²/s]

Im Versuchsaufbau entspricht dabei (Q) der Durchflussmenge durch die Probe pro Zeit. Der Filterquerschnitt (F) ist gegeben durch die Grundfläche des Probenkörpers, der einen Durchmesser von 10 cm hat. Aus dem aufgegebenen Wasserdruck ergibt sich proportional der Druckhöhenunterschied (h), wobei 1 bar einem Druckhöhenunterschied von 10 m entspricht. Die Fließstrecke (l) ist gegeben durch die Höhe des Probenkörpers (hier 25 cm). Als Durchströmungsmedien wurden Wasser und Kerosin eingesetzt (s.o.). Erst nachdem sich konstante Fließgeschwindigkeiten einstellten, wurden die endgültigen Messwerte ermittelt. Das effektive, wassergefüllte Porenvolumen wurde mehrfach ausgetauscht und darauf geachtet, dass sich vor dem Austausch eines Durchströmungsmediums konstante Messwerte einstellen.

2.2 Untersuchungen zu Korrelationsmöglichkeiten zwischen scheinbarer und wahrer Kerosinmächtigkeit

Ein Problem bei der Abschätzung des Umfangs einer Kontamination durch Fluide mit einer geringeren Dichte als Wasser besteht in der Überschätzung der Mächtigkeit dieser Fluide, (hier des Kerosins) im gefüllten Porenraum. Insbesondere, wenn nur die Kerosinmächtigkeit in der GWMS, zur Einschätzung zugrunde gelegt wird (s. Abb. 2).

Der mit Wasser gefüllte Porenraum umfasst den Grundwasser führenden Bereich und den geschlossenen Kapillarsaum. Die Mächtigkeit des geschlossenen Kapillarsaumes über dem Grundwasserspiegel ist abhängig von der Oberflächenspannung des Fluids und der Ausbildung des Porenraumsystems (größere Poren führen zu schmalen Kapillarsäumen).

Da eine GWMS praktisch eine Pore mit sehr großem Durchmesser darstellt, findet in ihr, im Gegensatz zum Sediment, kein Kapillaraufstieg statt. Der Flüssigkeitsspiegel in der GWMS stellt damit den "freien" im Sediment horizontal beweglichen Fluidspiegel dar. Die Oberfläche des wassergefüllten Porenraumes (im Sediment) liegt dadurch höher als der in der GWMS vorliegende Grundwasserstand.

Im Untergrund schwimmt das spezifisch leichtere Kerosin auf dem mit Wasser gefüllten Porenraum, d.h. auf dem geschlossenen Kapillarsaum. In der GWMS schwimmt das Kerosin auf dem Grundwasser.

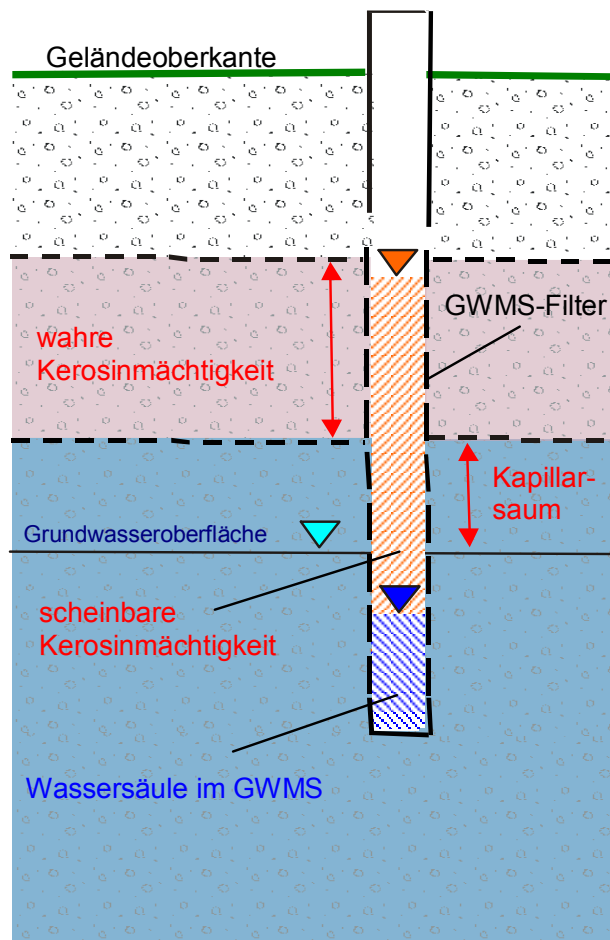


Abb. 2: Prinzipskizze der Verteilung von Kerosin und Wasserspiegelflächen im GWMS und im Grundwasserleiter [in Anlehnung an PEKDEGER 1999]

Zur Klärung der o.g. Problematik diente der im Kapitel 1 bereits angeführte Versuch. Hierbei handelt es sich um folgenden Versuchsaufbau. Der verwendete Versuchsbehälter (Acrylglas) hatte eine Größe von ca. 0,7 m * 0,4 m * 0,6 m (L*B*H), d.h. ein Volumen von ca. 170 l. An die Acrylglaswände wurden je ein 2" und 5" Filterrohr geklebt, um die Zusammenhänge zwischen Kerosinniveau und Mächtigkeit im Filterrohr und im Grundwasserleiter beurteilen zu können. Dieser Versuchsbehälter wurde bis ca. 10 cm unter Oberkante mit unkontaminiertem Sediment aus einem Schurf in der Nähe der Bohrung A gefüllt (ca. 140 l) und durch entsprechende Verdichtung eine vergleichbare Lagerungsdichte im Versuchsbehälter hergestellt. Korngrößenuntersuchungen belegen die gute Homogenität des im Versuchsbehälter eingebauten Lockergesteins (s.a. Anlage 1 - 2).

Färbeversuche

Färbeversuche konnten entfallen, da das Kerosin eine tiefschwarze Färbung aufwies.

2.3 Säulendurchlauf- und Säulenumlaufversuche (Eluationsversuche)

Zur Bestimmung der mit Wasser eluierbaren Kerosingehalte von zuvor mit Kerosin durchströmtem kontaminiertem Sediment wurden:

- a) Säulendurchlauf- und
- b) Umlaufsäulenversuche durchgeführt.

Die Länge der Säulen betrug jeweils 25 cm, der Durchmesser 10 cm. Das verwendete Probenmaterial für den Durchlaufsäulenversuch stammte aus der Bohrung B, welche kontaminiertes Sediment ange-
troffen hatte (Tiefe 2,25 - 2,50 m). Ebenfalls aus der Bohrung B wurde die Probe für den Umlaufsäulenversuch gewonnen (Teufenniveau von 2,75 – 3,00 m).

Säulendurchlaufversuch:

Das offene System diente der Untersuchung eines Durchbruchmaximums bzw. der Bestimmung der Abnahme der eluierbaren Kerosingehalte nach ständigem Durchströmen mit unkontaminiertem Wasser. Vom Versuchsaufbau ist er vergleichbar den Versuchen zur Bestimmung der Durchlässigkeiten, jedoch wird eine Schlauchpumpe anstelle eines gleichbleibenden Gefälles Δh eingesetzt. Insgesamt durchströmten ca. 25 Liter frisches Leitungswasser die Probe.

Umlaufsäulenversuch:

Die Sedimentdurchströmung erfolgte im geschlossenen Kreislauf. Im Umlauf befand sich ca. 1 Liter Wasser. Ziel des Versuches war die zeitliche Messung einer Gleichgewichtseinstellung und die Ermittlung des maximal mit Wasser eluierbaren Kerosingehaltes. Das Umlaufvolumen entsprach insgesamt ebenfalls ca. 25 Liter Wasser.

Um realistische Fließgeschwindigkeiten zu erhalten, wurden 250 ml/d durch die beiden Versuchsaufbauten gepumpt. Dies entspricht bei einem effektiven Porenvolumen von ca. 0,2 und einer Fließgeschwindigkeit von ca. 16 cm/d.

Innerhalb der Versuchsdauer vom 27.11.98 bis zum 04.03.99 erfolgten 5 Probennahmen. Die Probennahmen erfolgte nach 3, 10, 24, 52 und 101 Tagen nach Versuchsbeginn.

3 Ergebnisse und Interpretation

3.1. Ergebnisse der Durchlässigkeitsbestimmungen

Sieb- und Sedimentationsversuche (DIN 18123)

In Tabelle 1a und 1b sind die Ergebnisse der Sieb- und Sedimentationsversuche dargestellt. In der Anlage 1 und 2 (Sieb 1 und Sieb 2) finden sich die Darstellungen der Kornverteilungskurven.

Tab. 1a: Siebanalyse: Bestimmung des – *Durchlässigkeitsbeiwertes* - nach HAZEN, die H₂O₂ Zugabe diente der Aufoxidation d.h. der Zerstörung der organischen Phase (Kerosin)

Probe	k _f [m/s]
Sieb 1: unkontaminiertes Sediment mit Kerosin durchströmt, ohne H ₂ O ₂	6,00E-04
Sieb 1: s.o. mit H ₂ O ₂ (unkontaminiert, Liner 1,50 – 1,75 m)	6,00E-04
Sieb 2: kontaminiertes Sediment mit Kerosin durchströmt, ohne H ₂ O ₂	1,90E-04
Sieb 2: s.o. mit H ₂ O ₂ (kontaminiert, Liner 2,25 – 2,50 m)	1,90E-04

Tab. 1b: Siebanalyse: Bestimmung der – *Permeabilitäten* - aus den Durchlässigkeitsbeiwerten nach HAZEN, die H₂O₂ Zugabe diente der Aufoxidation d.h. der Zerstörung der organischen Phase.

Probe	Permeabilität [m ²]
Sieb 1 unkontaminiertes Sediment mit Kerosin durchströmt, ohne H ₂ O ₂	9,85E-11
Sieb 1 s.o. mit H ₂ O ₂ (unkont. Liner 1,50 – 1,75m)	9,85E-11
Sieb 2 kontaminiertes Sediment mit Kerosin durchströmt, ohne H ₂ O ₂	3,12E-11
Sieb 2 s.o. mit H ₂ O ₂ (kont. Liner 2,25 – 2,50m)	3,12E-11

Die Ergebnisse zeigen, dass keine Verklebung der Sedimentkörner durch das Kerosin stattgefunden hat. Es handelt sich bei diesen MKW um ein Gemisch aus Kerosin und 40 % Ottokraftstoff. Dies führt evtl. zu einer besseren Eluierbarkeit vom Sediment, bzw. nicht zu einer "Verklebung" der Sedimentpartikel.

Weitergehende mikroskopische Untersuchungen zur detaillierten Beschreibung der Korngefüge waren nicht vorgesehen.

Permeameterversuche (DIN 18130)

Die Ergebnisse der Permeameterversuche sind in der Tabelle 2 aufgelistet (s.a. Anlage 3 - 6).

Die *Durchlässigkeitsbeiwerte* betragen hier für das unkontaminierte wassergesättigte Sediment $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s und für das kerosingesättigte $4,5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Die Durchlässigkeiten sind in den jeweils "reinen" Medien, d.h. bei dem Vorhandensein von nur einer Phase größer, als nach Verdrängung durch eine andere Phase. Die größte Differenz von ca. 1 Zehnerpotenz stellt sich nach Verdrängung des Wassers durch das Kerosin bei einer zuvor nicht kontaminierten Probe ein. Die Verdrängung des Kerosins durch das Wasser führte innerhalb des Beobachtungszeitraumes nicht zu einer Verbesserung der Durchlässigkeit sondern zu einer Abnahme von $4,5 \cdot 10^{-5}$ auf $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Fachinformationen zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg - Nr. 8 -

Die *Porenvolumina* wurden durch Wägung an einem Ausstechzylinder für die ungestörte Probenahme ermittelt und betragen $n = 0,35$. Aus den Verdrängungsversuchen (s.o.) lassen sich die effektiven Porenvolumina berechnen. Sie liegen in guter Übereinstimmung mit den Versuchen aus dem Versuchsbehälter (Korrelationsuntersuchungen zur scheinbaren/wahren Kerosinmächtigkeit) bei $n_{\text{eff}} = 0,25$ bis $0,27$.

Die ermittelten Durchlässigkeiten sind in Tabelle 2 a) als k_f -Werte angegeben. Für einen direkten Vergleich wurden die Permeabilitäten errechnet. Dazu werden für das Kerosin die Parameter Dichte und Viskosität benötigt. Die kinematische Viskosität wurde nach DIN 51561 bestimmt. Sie beträgt für die im o.g. Versuchsbehälter und in den k_f -Wertbestimmungen eingesetzte Kerosinphase $1,62 \text{ mm}^2/\text{s}$. Damit ergeben sich die in Tab. 2 b) angegebenen Permeabilitäten.

Tab. 2: a) Durchflußmessungen: Bestimmung des k_f -Wertes mittels einer stationär-hydraulischen Versuchsanordnung (DIN 18130),
b) Umrechnung in Permeabilitäten [m^2]

2 a) Durchflußmessungen				
Versuch	Sediment	Fluid	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	
1	kontaminiert (2,25 - 2,50 m)	Kerosin		4,50E-05
2	unkontaminiert (1,50 – 1,75 m)	Wasser		1,50E-04
3	kontaminiert (2,25 - 2,50 m)	Wasser verdrängt Kerosin	Beginn	2,50E-05
			Ende	1,40E-05
4	unkontaminiert (1,50 – 1,75 m)	Kerosin verdrängt Wasser	Beginn	1,20E-05
			Ende	1,20E-05
2 b) Umrechnung in Permeabilitäten				
Versuch	Sediment	Fluid	Permeabilität [m^2]	
1	kontaminiert (2,25 - 2,50 m)	Kerosin		7,39E-12
2	unkontaminiert (1,50 – 1,75 m)	Wasser		2,46E-11
3	kontaminiert (2,25 - 2,50 m)	Wasser verdrängt Kerosin	Beginn	4,10E-12
			Ende	2,30E-12
4	unkontaminiert (1,50 – 1,75 m)	Kerosin verdrängt Wasser	Beginn	1,97E-12
			Ende	1,97E-12

Auch die Säulendurchlauf- und Umlaufsäulenversuche (Versuchsdauer ca. 100 d) lassen keinen großen zusätzlichen Austrag an Kerosin erkennen, so dass eine kurzfristige Verbesserung der Durchlässigkeit nicht wahrscheinlich ist. Kerosinreste verbleiben offenbar im Korngerüst und senken daher die Durchlässigkeit für den Transport von Wasser ab. Als Anlage sind die jeweiligen Verdrängungskurven beigefügt (s. Anlage 7 und 8).

3.2 Ergebnisse - Untersuchungen zu Korrelationsmöglichkeiten zwischen scheinbarer und wahrer Kerosinmächtigkeit

Versuchsaufbau

Der Versuchsbehälter (Grundfläche 28 dm², s.a. Kap 2.2) zur Simulation des Grundwasserleiters wurde mit unkontaminiertem Sediment aus einem Schurf in der Nähe der Bohrung A befüllt. Ein halbiertes 2 Zoll und 5 Zoll Filterrohr wurde jeweils an den gegenüberliegenden Seiten an die Acrylglaswände des Versuchsbeckens geklebt, um die Niveaus von Grundwasser und Kerosinphase in den Filterrohren und den Grundwasserleitersedimenten zueinander in Beziehung setzen zu können.

Kerosin hat i.d.R. eine Dichte von ca. 0,8 g/cm³, d.h. ungefähr 20 % Dichteunterschied zum Wasser. Die Versuche zeigen, dass das Kerosin im Grundwasserleiter offensichtlich nicht das Verhalten eines "schwimmenden Eisberges" hat, wie es in den reinen Flüssigkeiten der Fall ist. Bei der Untersuchung des Niveaus von "Kerosinspiegel" und Wasserspiegel in kommunizierenden Röhren ist ein Verhältnis von ca. 1:4 zu messen. Die Kerosinphase erhebt sich ca. 1:5 ihrer Mächtigkeit über die Grundwasseroberfläche, 4:5 sind unterhalb der Grundwasseroberfläche.

Dieses Verhältnis konnte bei einem Vergleich des Kerosinstandes im Sediment und des Kerosinpegels im Filterrohr nicht beobachtet werden. Hier scheint es sich mehr um ein Verhältnis von 1:6 zu handeln. Diese Aussagen ergeben sich aus einer Bilanzierung der in dem Versuchsbehälter eingeleiteten Phasen bei Gleichgewichtseinstellung nach ca. 3 Wochen. Dies ist eine gegenüber der relativ geringen Differenz bei der Ermittlung der Durchlässigkeitswerte eine enorme Verzögerung der Gleichgewichtseinstellung gegenüber Wasser.

Die Befüllung des Sedimentbeckens mit Wasser ergab über die Pegelstände im Versuchsbehälter (bei Berücksichtigung des wassererfüllten Kapillarsaumes) eine Porosität von 0,25. Nach der Befüllung mit 10 l Wasser erfolgte die Eingabe des Kerosins an vier Punkten dicht über dem Grundwasserspiegel. Die eingeleitete Kerosinmenge betrug 3.700 ml. Nach einer Gleichgewichtseinstellung in den Beobachtungsrohren wurde in diesen eine Kerosinmächtigkeit von 20,9 cm gemessen. Nach Abzug der beiden mit Kerosin erfüllten Volumina der Beobachtungsrohre (1.460 ml) verbleibt ein Kerosinrest für das Sediment im Versuchsbecken von 2.240 ml. Dies führt bei einer Porosität von 0,25 zu einer Kerosinmächtigkeit im Sediment von 3,2 cm (unter der Annahme gesättigter Verhältnisse für das Kerosin im effektiven Porenvolumen n_{eff}). Damit beträgt das Verhältnis der Kerosinmächtigkeit im Sediment gegenüber der Kerosinmächtigkeit im Beobachtungsrohr ca. 1:6.

Eine zusätzliche Befüllung mit weiteren 1.000 ml Kerosin führte zum gleichen Verteilungsverhältnis zwischen Kerosinmächtigkeit im Sediment zu Kerosinmächtigkeit im Beobachtungsrohr.

Beobachtung der Phasengrenzen

Die gute Färbung des Kerosins ließ eine deutliche Trennung zwischen Wasserphase und Kerosinphase im Sedimentbehälter erhoffen. Die hervorragende optische Erkennbarkeit dieser beiden Phasen im Beobachtungsrohr erwies sich jedoch als nicht trennscharf genug, um im Sediment die Pha-

sengrenzen eindeutig zu bestimmen. Eine Einfärbung der Phasen, wie sie hier vorlag, führt bei einem derartig feinkörnigen Sediment nicht zu einer optischen Unterscheidbarkeit.

Der Versuchsbehälter wurde daraufhin so verändert, dass ca. im 1 cm Abstand kleine Entnahmestopfen mit Telfon kaschierten Butyl-Gummidichtungen, wie bei dem Verschluss von Head-Space Gefäßen, eingbohrt wurden. Mit einer Spritze lässt sich die Dichtung einstechen und Flüssigkeit dem Sediment entnehmen. Unabhängig von der Entnahmehöhe war mit dieser Art der Porenwasserentnahme nur die Wasserphase zu gewinnen.

Die Beobachtung der Phasengrenze war weder auf direkte (optische) noch indirekte Weise (Flüssigkeitsentnahme) möglich. Allein die Berechnungen ergeben Anhaltswerte.

MKW-Gehalte am Sediment

2 Sedimentproben aus dem Versuchsbehälter (5 – 10 cm und 15 – 20 cm über (Grund/Behälterboden) wurden auf ihren Kerosingehalt (bzw. MKW) hin untersucht (s. Tab. 3).

Tab.3: Ergebnisse der Bestimmung der MKW – Gehalte

Untersuchungs-Parameter	Versuchsbecken	Versuchsbecken	Umlauf-säulenversuch	Säulendurchlaufversuch
	5 - 10 cm ü. Grund	15 - 20 cm ü. Grund		
MKW [mg/kg TS] ISO / TR 11046	30	3.300	6.800	1.900
			(nach ca. 100 Tagen)	
ml Kerosin / 1kg –Sed. Volumen-%	0,0375	4,125	8,5	2,375
Kerosin bei n = 0,35	0,01	0,72	1,47	0,41
Anteil an der n_{eff} (25% vom Gesamtvolumen)	0,03	2,86	5,90	1,65

Bei der Sedimentprobe (Versuchsbecken) aus dem Niveau 5 - 10 cm über Grund handelt es sich evtl. um eine Kontamination bei der Probennahme. Die Sedimentprobe (Versuchsbecken) aus dem Niveau 15 - 20 cm über Grund hätte eigentlich eine größere Kerosinmenge erwarten lassen. Mit einem Anteil von nur ca. 3 % am effektiven Porenvolumen liegt der MKW-Gehalt im Bereich dessen, was in den Eluationsversuchen (Umlaufsäulen-/Säulendurchlaufversuch) gemessen wurde.

3.3 Ergebnisse - Säulendurchlauf- und Umlaufsäulenversuche (Eluationsversuche)

Die Wässer der Eluationsversuche wurden nach Versuchsende einem externen Labor zur Bestimmung der MKW-Konzentration im Eluat zugeführt (s. Tabelle 4). Zunächst wurde davon ausgegangen, dass ein Probenvolumen von 10 ml ausreichend sei. Nachträglich stellte sich heraus, dass zur MKW-Bestimmung ca. 1 l benötigt wird. Dieses Probennahmenvolumen stand nur aus den Durchlaufsäulenversuche zur Verfügung.

Beim Umlaufsäulenversuch war dies aufgrund der Konzeption eines nicht zu hohen Verhältnisses von Wasservolumen zu Sedimentmasse – um möglichst naturnah zu bleiben – bei einem Liter Gesamtvolumen nicht möglich. Größere Entnahmemengen als 10 ml hätten das V/m Verhältnis (V/m = Volumen zu Masse) zu stark beeinträchtigt, da es über den Versuchsverlauf möglichst konstant bleiben sollte. Die geringeren Probenvolumina führten zu einer gegenüber dem Standardanalysenvolumen schlechteren Nachweisgrenze (3,7 – 5,1 mg/l). Die Nachweisgrenze liegt bei MKW (IR-KW), DIN 38409 H 18 i.d.R. bei 0,1 mg/l.

Die Ergebnisse der Tabelle 4 zeigen deutlich, dass nach einer anfänglichen Verdrängung keine größeren Mengen an MKW mehr aus den Säulen ausgewaschen werden. Die Erstbeprobung (nach 3 Tagen) des *Durchlaufsäulenversuches* wies eine Konzentration von 8,7 mg/l (s. Tabelle 4) auf. Danach lagen die Werte jeweils unter der Nachweisgrenze, mit Ausnahme der Probe 4 (480 mg/l). An dieser Probe zeigte sich bei Versuchsende eine hohe Konzentration von Kerosin unter der oberen Glasfritte (Durchströmungsrichtung von unten nach oben entsprechend der Dichtedifferenz der beiden Phasen). Obwohl die Fritte eine höhere Porosität aufweist als das Sediment, scheint hier für Wasser eine bevorzugte Wegsamkeit gegeben zu sein. Bei der 4. Probennahme hatte sich offensichtlich ein Teil dieser "Kerosinblase" in Bewegung gesetzt. Ansonsten scheint die Löslichkeit der MKW's auch bei einer, gegenüber einer typischen Grundwassertemperatur von ca. 10°C erhöhten Labortemperatur von 20° C beschränkt zu sein, wie die Probe 3 und 5 mit ihren MKW-Konzentrationen von < 0,1 mg/l belegen.

Tabelle 4: MKW-Konzentration der Eluationversuche (Gesamtdurchflussvolumen jeweils 25 l)

Durchlaufsäulenversuch		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Zeit	[d]	3	10	24	52	101
Volumen	[ml]	10	10	500	1000	1000
MKW	[mg/l]	8,7	< 4,8	< 0,1	480	< 0,1

Umlaufsäulenversuch		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Zeit	[d]	3	10	24	52	101
Volumen	[ml]	10	10	10	10	10
MKW	[mg/l]	< 5,1	< 4,5	< 5,1	< 4,7	< 3,7

Ausgehend von den Durchlaufsäulenversuchen ließe sich evtl. auf die Ergebnisse der Umlaufsäulenversuche zurückschließen, welche immer unterhalb der (höheren) Nachweisgrenze von ca. 5 mg/l (aufgrund des geringeren Probennahmenvolumens) lagen (s. Tabelle 4).

Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass sich - nach der anfänglichen Verdrängung - nur sehr geringe Mengen an MKW eluieren ließen. Offensichtlich wird Kerosin am besten in "geschlossener Phase" durch Wasser effektiv verdrängt. Wenn keine zusammenhängende Phase, sondern nur noch kleine isolierte Kerosininseln (Insulare Phase) vorhanden sind, wird Kerosin unter stationären Strömungsbedingungen kaum noch ausgetragen.

Nach Abschluss der Eluationsversuche wurde jeweils aus der Säulenmitte eine Sedimentprobe zur Untersuchung der im Sediment verbliebenen MKW-Restgehalte entnommen und im Labor untersucht (s. Tab. 3).

Diese Angaben belegen, dass im Sediment des Umlaufsäulenversuches bei dem die Kerosinphase durch das Wasser verdrängt wurde, nur noch ca. 2 % des Grundwasserleitervolumens, bzw. ca. 6 % des effektiven Porenvolumens (n_{eff}) mit Kerosin erfüllt bleiben (Restsättigung). Das effektive Porenvolumen beträgt ca. $n_{\text{eff}} = 0,25$. Dieser Wert konnte aus den Verdrängungsversuchen mit den Linern abgeschätzt werden (s.o.), bei dem das, durch das Wasser verdrängte, Gesamtvolumen des Kerosins auf das Linervolumen bezogen wurde. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Kerosinphase nur das effektiv nutzbare Porenvolumen erfüllt, dann bedeutet eine Restsättigung von ca. 1,5 % des Gesamtvolumens nach der Verdrängung des Kerosins durch nachströmendes Wasser, dass nur noch etwa 6 % der ursprünglichen Kerosinmenge im Sediment verbleiben. Über 90 % der Kerosinmenge wurden bei den Verdrängungsversuchen mit nachgeschalteter Eluation aus dem Gestein mobilisiert.

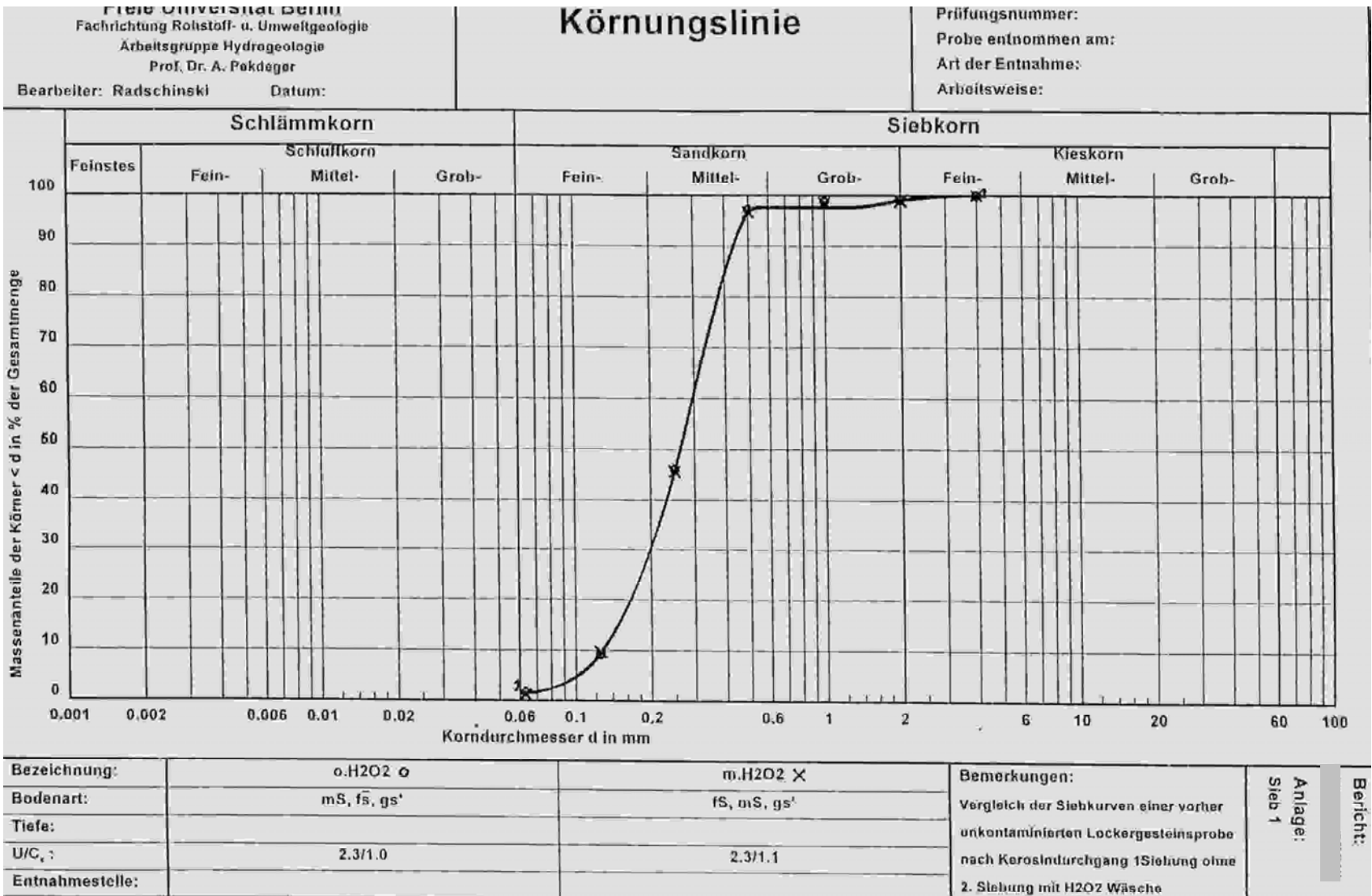
Notwendig für diese Mobilisierung ist ein ausreichendes Gefälle. Die Versuche im Sedimentbehälter dagegen lassen eine nur sehr stark verzögerte Reaktion des Kerosins erkennen.

Für ein besseres Verständnis der hier ablaufenden Vorgänge dieser Stoffflüsse zweier Phasen wären weitere grundlegende Untersuchungen notwendig.

Anlage 1

Körnungslinie

der unbehandelten und mit H₂O₂ gereinigten Sediment-
probe des zuvor unkontaminierten Liners



Anlage 2

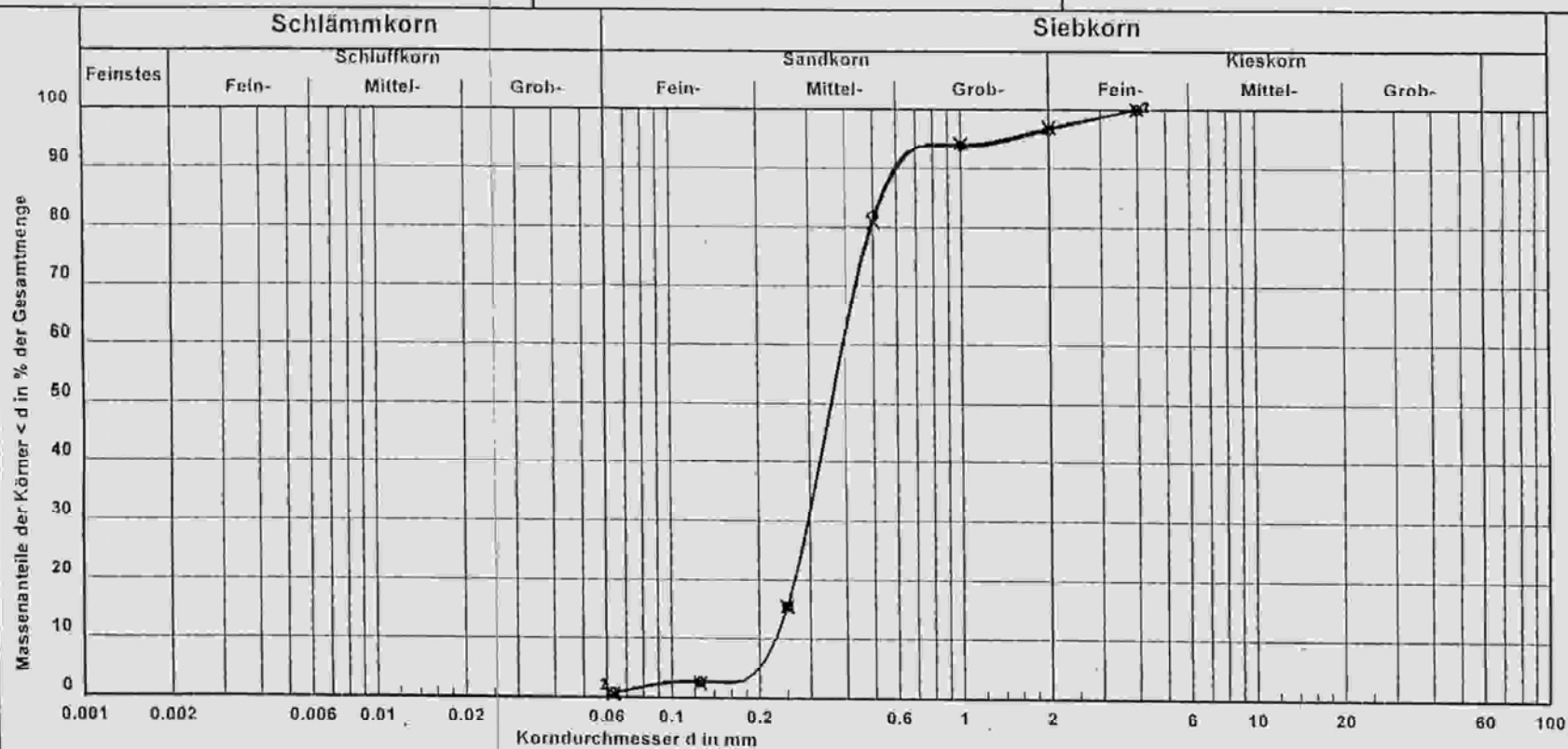
Körnungslinie

der unbehandelten und mit H₂O₂ gereinigten Sedimentprobe
des bereits bei der Probennahme kontaminierten Liners

Körnungslinie

Prüfungsnummer:
 Probe entnommen am:
 Art der Entnahme:
 Arbeitsweise:

Bearbeiter: Radschinski Datum:



Bezeichnung:	o.H2O2 o	m.H2O2 X	Bemerkungen: Vergleich der Siebkurven einer vorher kontaminierten Lockergesteinsprobe nach Kerosindurchgang 1 Siebung ohne 2. Siebung mit H2O2 Wäsche
Bodenart:	mS, gs, fs'	mS, fs, gs	
Tiefe:			
U/C _s :	1.7/1.0	1.7/1.0	
Entnahmestelle:			

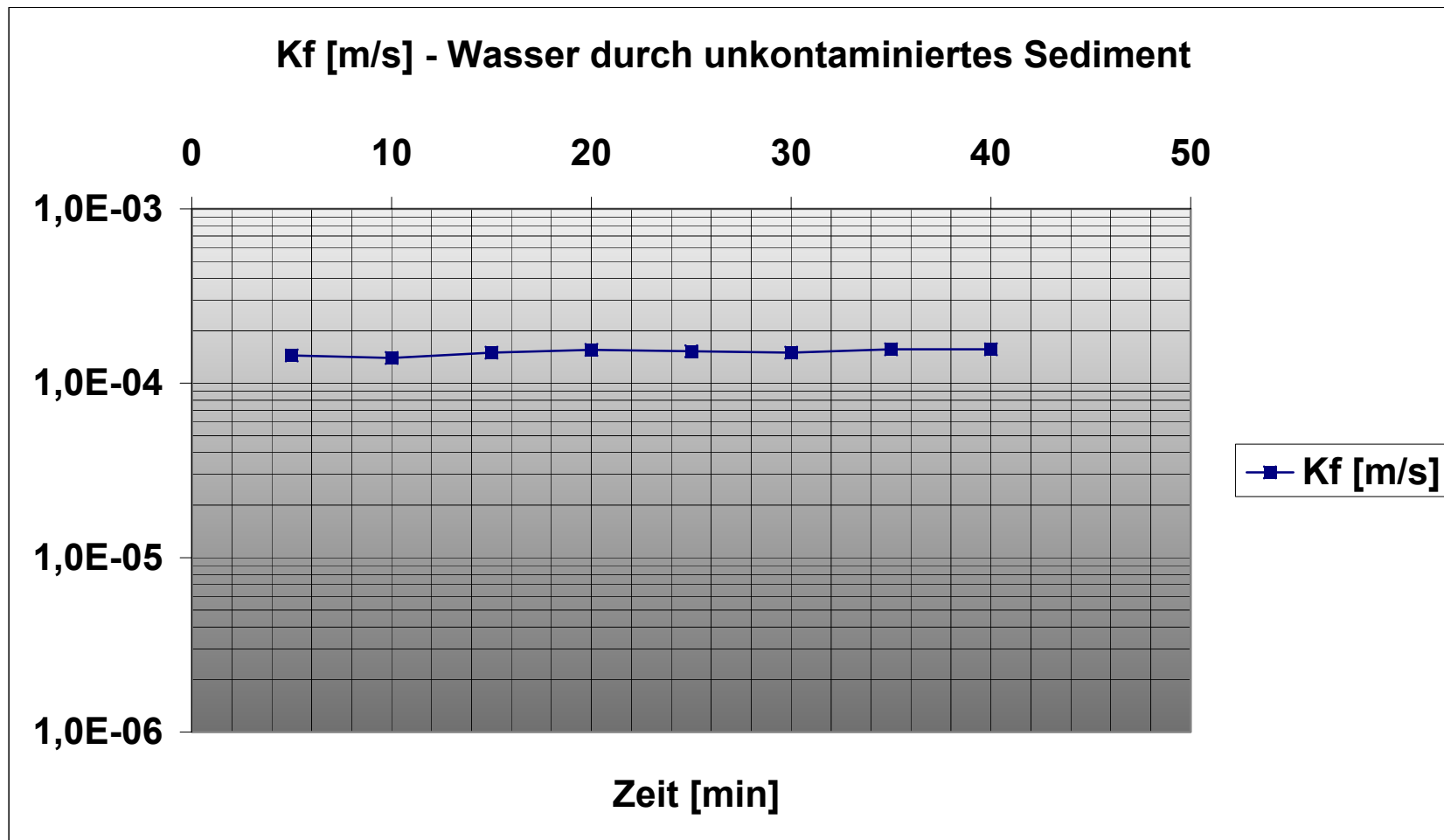
Anlage:
 Sieb 2

Bericht:

Anlage 3

Entwicklung der k_f - Werte

- Wasser durch unkontaminiertes Sediment -

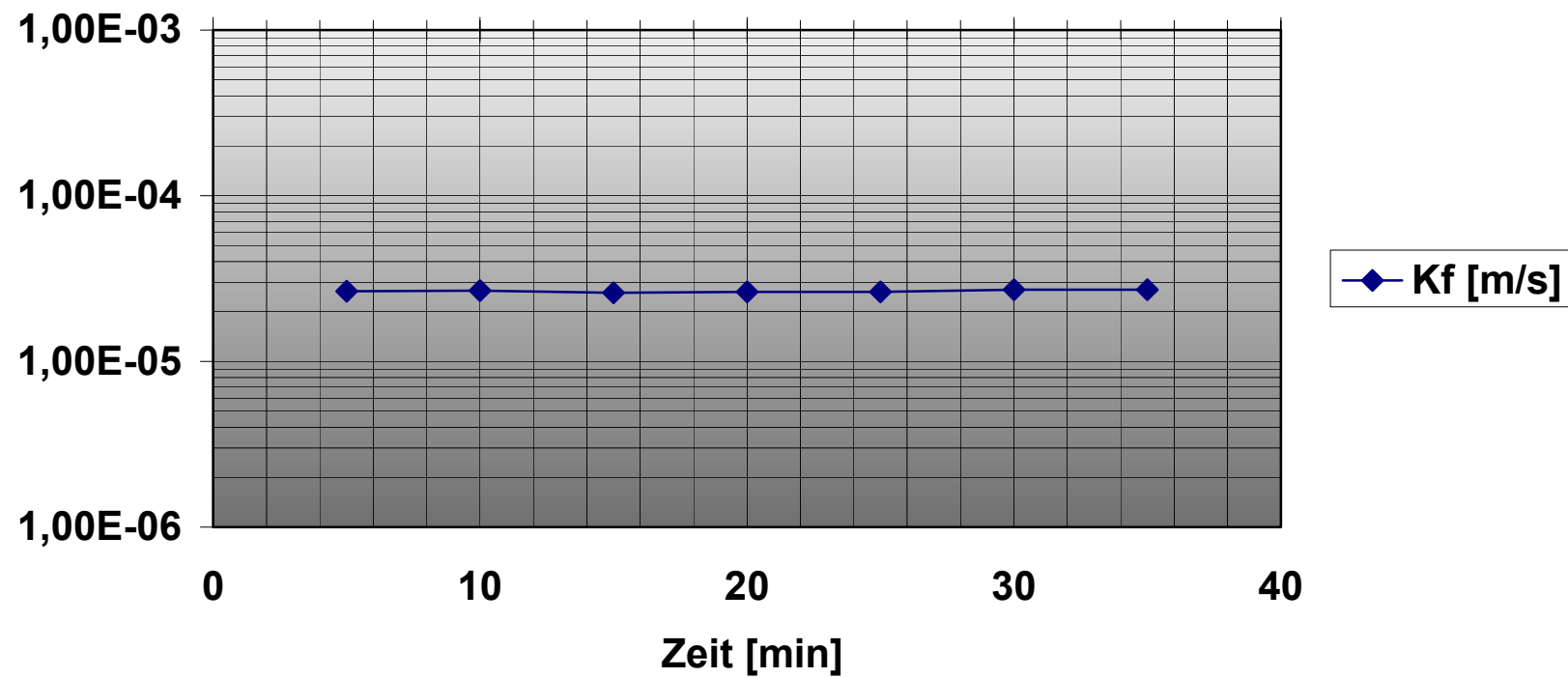


Anlage 4

Entwicklung der k_f - Werte

- Kerosin durch kontaminiertes Sediment -

Kf [m/s] - Kerosin durch unkontaminiertes Sediment

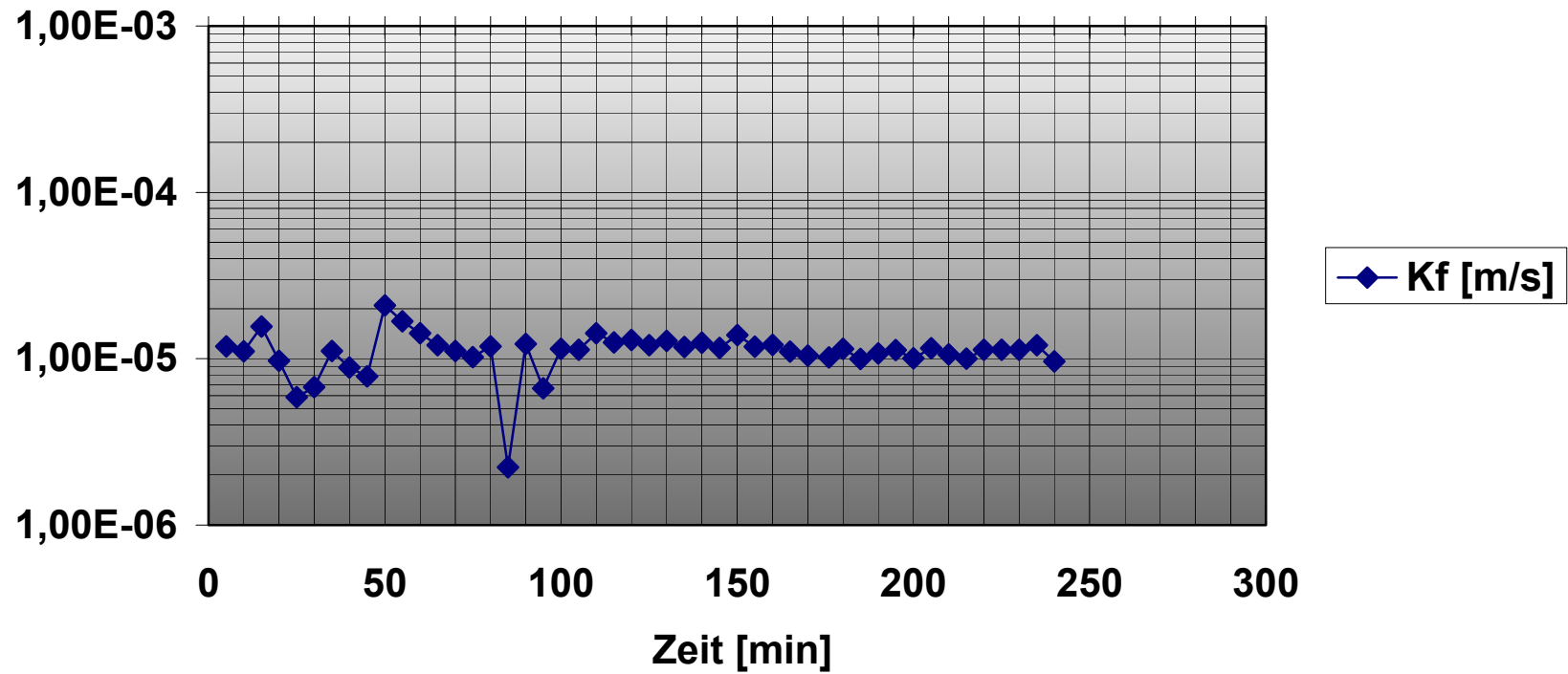


Anlage 5

Entwicklung der k_f - Werte

- Wasser wird durch Kerosin verdrängt -

Kf [m/s] - Kerosin verdrängt Wasser im unkontaminierten Sediment

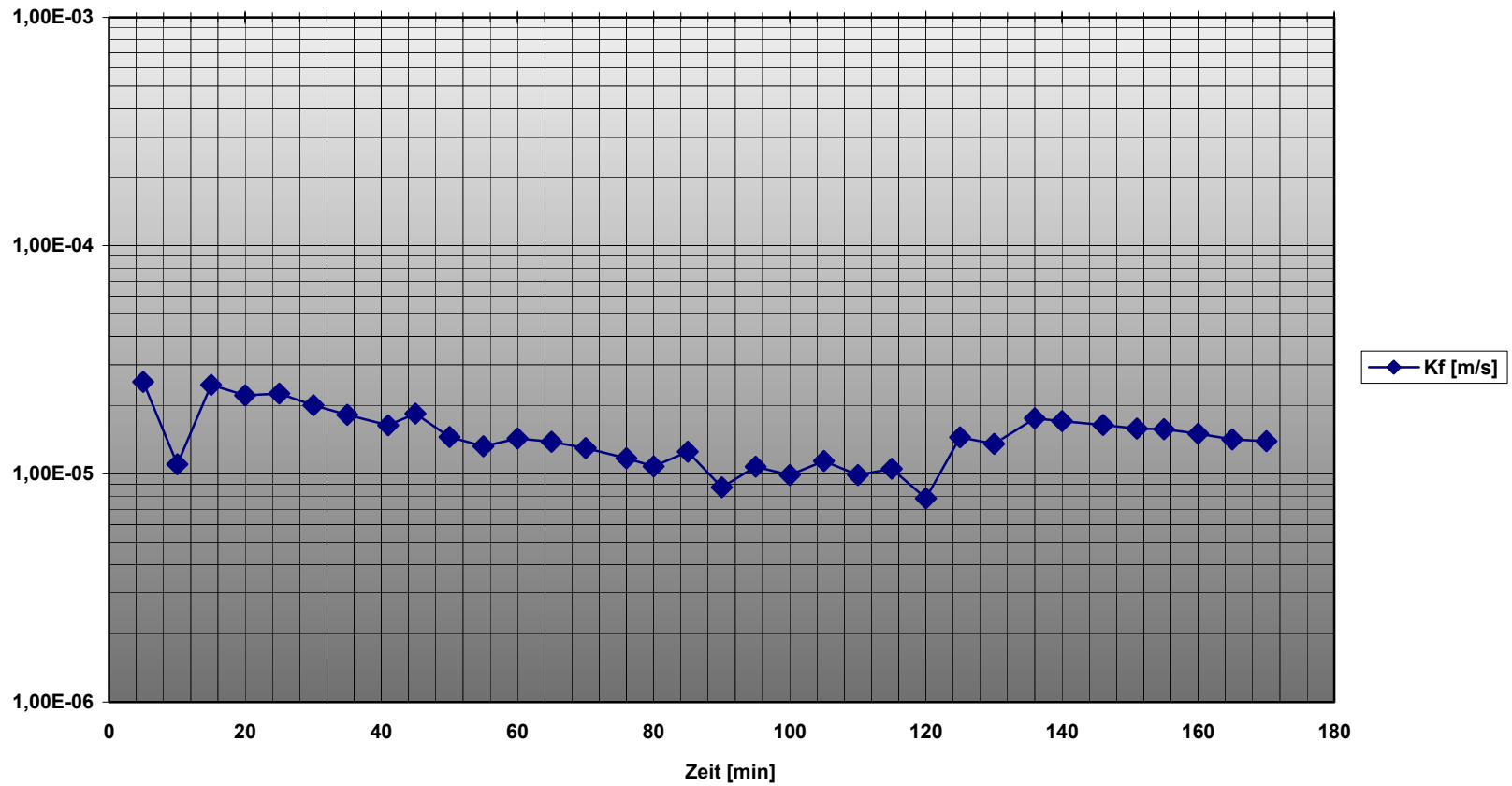


Anlage 6

Entwicklung der k_f - Werte

- Kerosin wird durch Wasser verdrängt -

K_f [m/s] - Wasser verdrängt Kerosin im kontaminierten Sediment

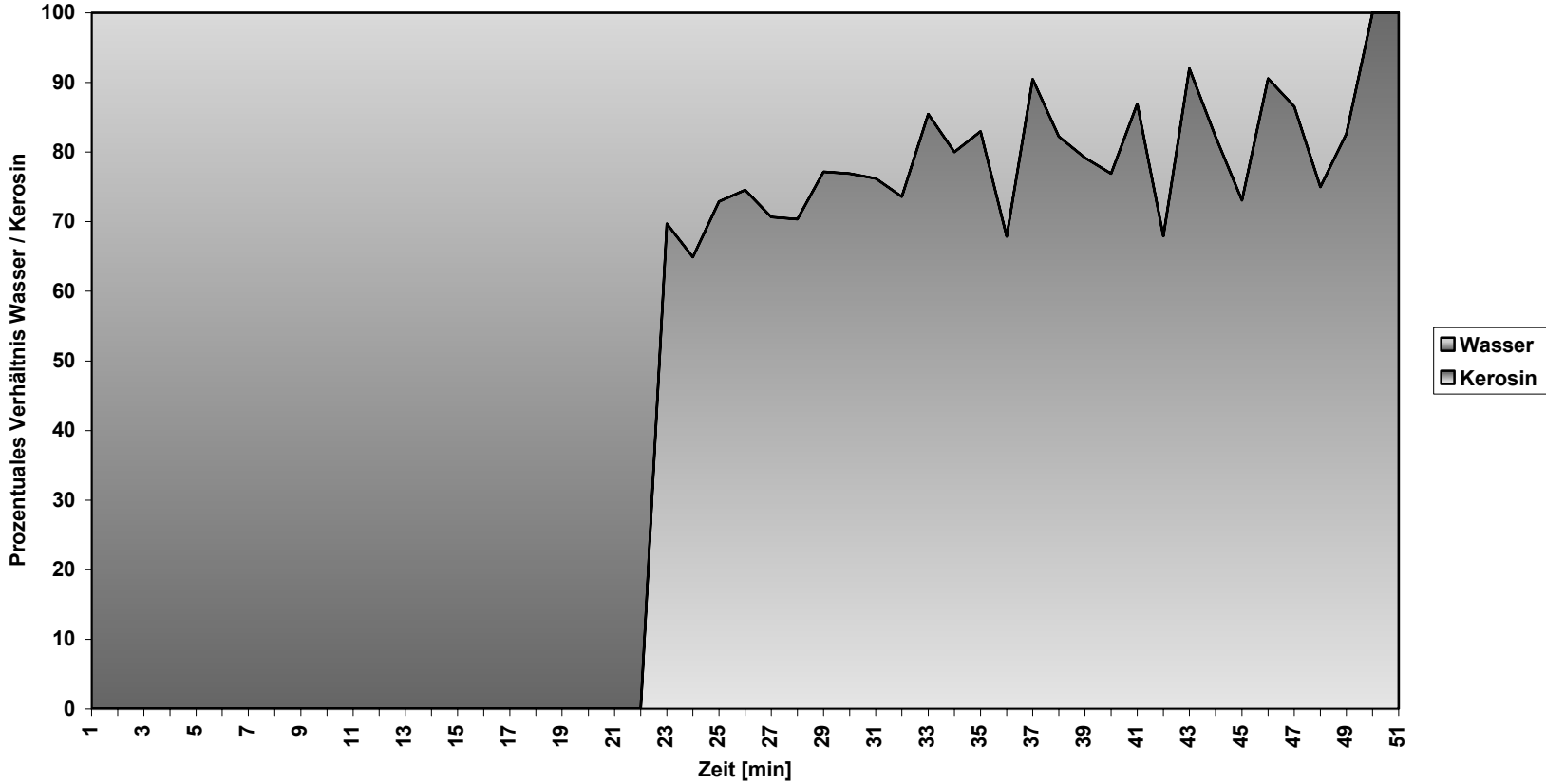


Anlage 7

Verdrängungskurve (zeitliche Entwicklung)

- Kerosin verdrängt Wasser, Liner (1,50 – 1,75 m) -

Kerosin verdrängt wasser Liner (1,50 - 1,75m)

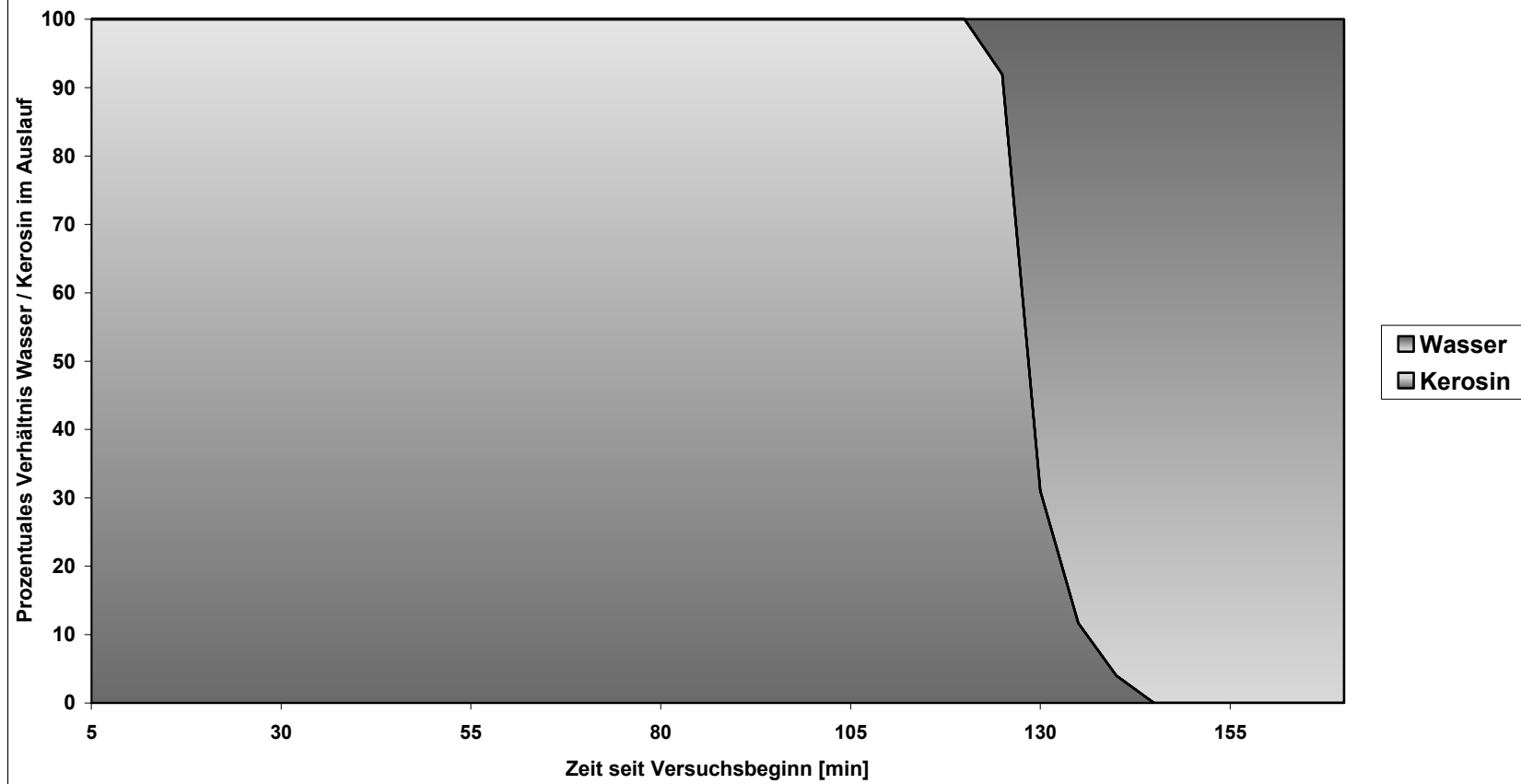


Anlage 8

Verdrängungskurve (zeitliche Entwicklung)

- Wasser verdrängt Kerosin, Liner (2,50 – 2,75 m) -

Wasser verdrängt Kerosin Liner (2,50 - 2,75m)

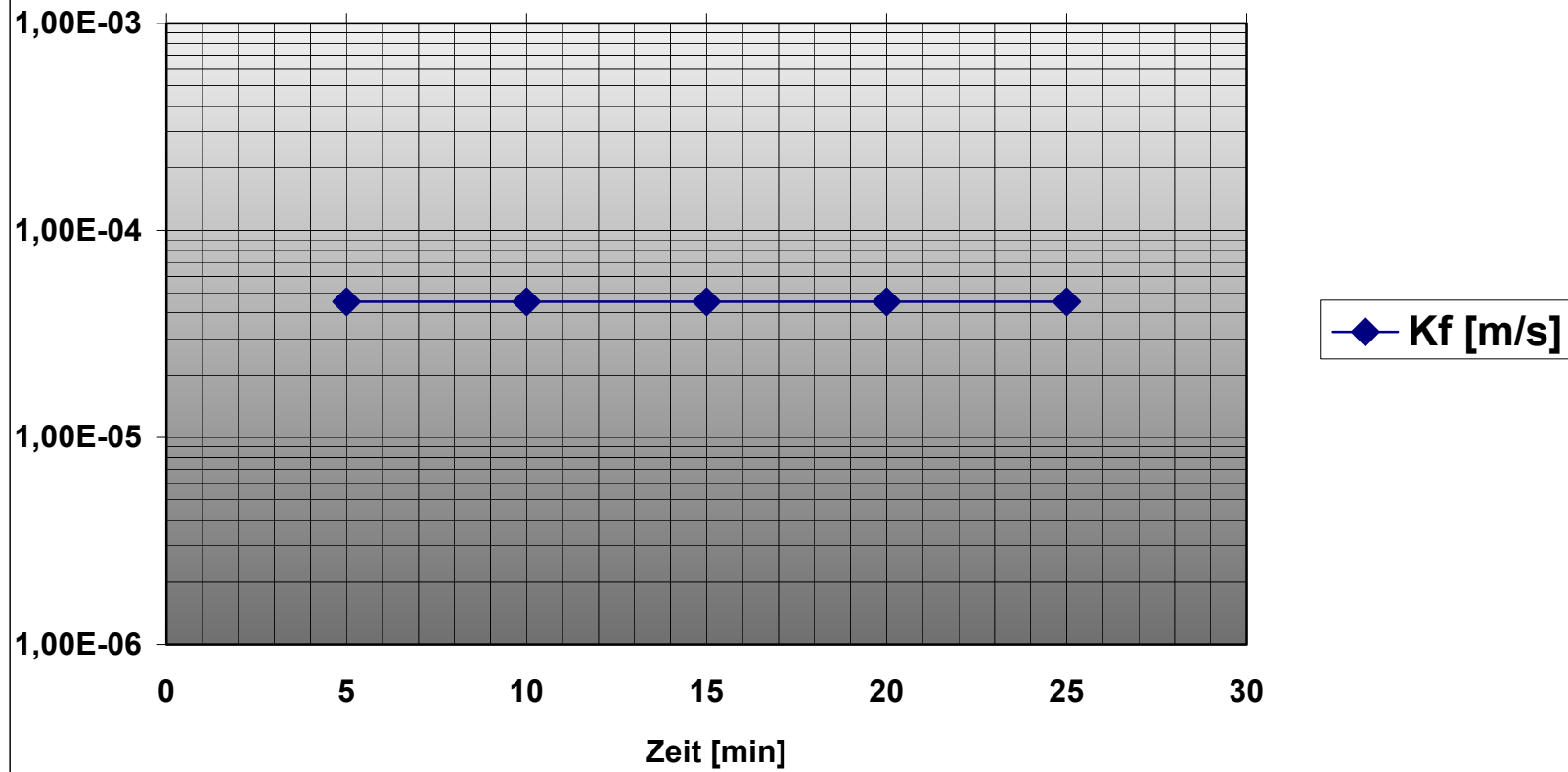


Anlage 9

Entwicklung der k_f - Werte

- Kerosin durch unkontaminiertes Sediment -

K_f [m/s] - Kerosin durch kontaminiertes Sediment



Anlage 10

Entwicklung der k_f - Werte

- Wasser im kontaminierten Sediment,
nach der Verdrängung von Kerosin -

Kf [m/s] - Wasser im kontaminierten Sediment, nach der Verdrängung von Kerosin

