



**Technische
Universität
Braunschweig**



Technische Universität Braunschweig
Prof Dr.-Ing. Jochen Aberle
Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Abteilung Wasserbau und Gewässermorphologie
Beethovenstr. 51 a, 38106 Braunschweig

Bericht Nr. 1112a

Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes von Kiesen (2. Fassung)

Auftraggeber:

K+S Minerals and Agriculture GmbH

Bearbeitung:

Dr. Francisco Núñez-González

Braunschweig, Mai 2021



Technische Universität Braunschweig
Prof Dr.-Ing. Jochen Aberle
Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Abteilung Wasserbau und Gewässermorphologie
Beethovenstr. 51 a, 38106 Braunschweig

Bericht Nr. 1112a

Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes von Kiesen (2. Fassung)

Auftraggeber: K+S Minerals and Agriculture GmbH
Postfach 1163
36267 Philippsthal

Bearbeitung: Dr. Francisco Núñez-González

Braunschweig, Mai 2021

Prof. Dr.-Ing. Jochen Aberle

Dr. Francisco Núñez González

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Versuchsaufbau und Durchführung	1
2.1	Versuchsrinne und Materialien.....	1
2.2	Versuchsdurchführung.....	3
2.2.1	Versuche mit unterschiedlichen Durchflüsse.....	3
2.2.2	Versuche mit konstantem Durchfluss.....	3
3	Methoden zur Berechnung der k_f -Werte.....	4
3.1	Grundlagen.....	4
3.2	Lineare Methode zur Berechnung der k_f -Werte.....	4
3.3	Nichtlineare Methode zur Berechnung der k_f -Werte	5
4	Ergebnisse.....	5
4.1	Versuchsergebnisse	5
4.2	Ermittlung der k_f -Werte	8
4.3	Abhängigkeit vom hydraulischen Gradienten und Vergleich mit anderen Datensätzen	13
5	Zusammenfassung	15
6	Literaturverzeichnis.....	15

1 Einleitung

Das Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig wurde von der Firma K+S Minerals and Agriculture GmbH beauftragt, Laborversuche zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts k_f von gebrochenem Kies in den Kornfraktionen 8-32 mm und 16-32 mm durchzuführen. Nach Absprache mit K+S Minerals and Agriculture GmbH wurden die Versuche im Leichtweiß-Institut in derselben Rinne und mit derselben Versuchsdurchführung durchgeführt, wie die Versuche für die Firma upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH im Jahr 2012 (LWI-1027). Für eine vollständige Übersicht der Ergebnisse werden in diesem Bericht die im Jahr 2012 erhobenen Daten mit den neuen Daten verglichen.

Für den Versuchsablauf wurden zwei Verfahren angewendet, um die Unabhängigkeit der Ergebnisse vom Ablauf zu prüfen und um den untersuchten Bereich der hydraulischen Gradienten in Richtung geringere Gradienten zu erweitern. In der ersten Berichtsfassung wurden beide Versuchsabläufe nur für das gröbere Material durchgeführt. Der erweiterte Gradientenbereich sollte auch für das feinere Material untersucht werden. In der vorliegenden Fassung sind die Ergebnisse integriert, so dass dieser Bericht den Bericht LWI-1112 vom April 2021 ersetzt.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Versuchsrinne und Materialien

Für die Durchführung der Versuche wurde eine 8,3 m lange, 0,3 m breite und 0,5 m hohe horizontale Versuchsrinne in der Versuchshalle des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau verwendet (siehe Abb. 1). Der Rinne wird Wasser aus dem geschlossenen Kreislauf der Versuchshalle zugeführt. Dieses System beinhaltet einen Hochbehälter mit 10 m Druckhöhe, der einen konstanten Durchfluss ohne Schwankungen gewährleistet. Der Zufluss in die Rinne wurde mit einem induktiven Durchflussmesser gemessen (Flowtec Typ Pulsmag T, DN50, Genauigkeit $\sim 0,5\%$) und mit einem Schieber im Zulaufrohr zu der Rinne kontrolliert. Der Wasserstand wurde mit einer überströmten Wehrklappe am Ende der Rinne reguliert und mit einem Stechpegel gemessen (Genauigkeit $\pm 0,1$ mm). Schienen über den Wänden der Rinne erlauben eine zielgenaue Positionierung des Stechpegels.

Die zu untersuchende Kiesprobe wurde mit einer zufälligen Anordnung in einem etwa 4 m langen Abschnitt der Rinne eingebracht. Dies entspricht ungefähr 1 m^3 Material. Da der Wasserstand in der Kiesschicht nicht mit dem Stechpegel gemessen werden konnte, kam hier eine Messharfe zum Einsatz (siehe Abb. 2). Der Wasserstand in der Messharfe wurde ebenfalls mit einem Stechpegel gemessen (Genauigkeit $\pm 0,1$ mm). Die sieben Zylinder der Messharfe waren über Schläuche, die einige Zentimeter in den Kieskörper ragten, mit sieben Messpunkten entlang des eingebauten Kieskörpers verbunden. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten betrug 1 m, mit Ausnahme des letzten Punktes stromabwärts, der 0,9 m vom vorletzten Punkt entfernt war. Die Messpunkte wurden stromabwärts

durchnummeriert. Messpunkt 1 (Koordinate $x=0$) befand sich 2 m unterstrom des Rinneneinlaufs. Die Messpunkte 2-6 lagen im Kieskörper. Der Abstand zwischen dem Messpunkt 7 (Koordinate $x=5,9$ m) und der Wehrklappe betrug 0,40 m (siehe Abb. 1).

Bei den untersuchten Materialien handelt es sich um gebrochenen Etterwinden Porphyrsplitt mit den Körnungen 8-32 mm und 16-32 mm (siehe Tab. 1).

Tab. 1 Bezeichnung und Körngrößen der getesteten Materialien

Bezeichnung	Proben Nr.	Korngroße des Materials
Material 1	32832	Etterwinden Porphyrsplitt 8 – 32 mm
Material 2	321632	Etterwinden Porphyrsplitt 16 – 32 mm

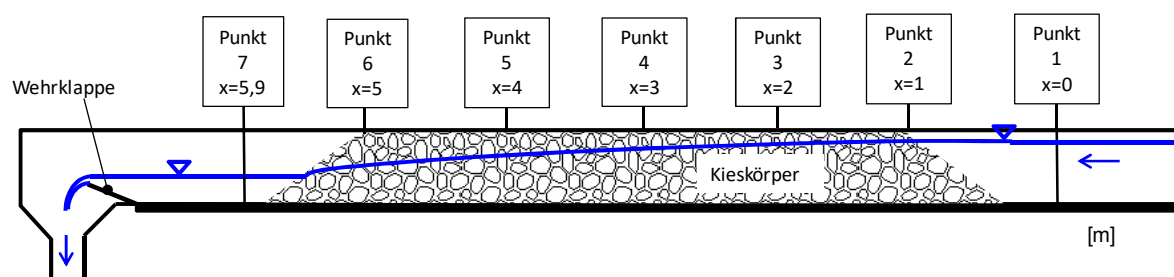


Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus mit den Positionen der Messpunkte



Abb. 2: Druckmesseinrichtung und Pegelharfe

2.2 Versuchsdurchführung

Um die Durchlässigkeit des Materials zu ermitteln, wurden im Kieskörper verschiedene hydraulische Gradienten bei verschiedenen Durchflüssen eingestellt. Die Durchlässigkeit wurde aus den Wasserständen im Kieskörper berechnet.

Zwei verschiedene Methoden wurden verwendet, um die hydraulischen Gradienten in der Rinne zu erzeugen:

- (1) Die erste Methode berücksichtigte das gleiche Verfahren das bereits im Bericht LWI-1027 (2012) beschrieben worden ist. Dabei wurden unterschiedliche Durchflüsse untersucht.
- (2) Die zweite Methode berücksichtigte einen konstanten Durchfluss und unterschiedliche Wasserstände stromabwärts, die mit der Wehrklappenstellung eingestellt wurden.

Anhand der Messwerte wurde der Durchlässigkeitsbeiwert mittels einer linearen und einer nicht-linearen Regressionsmethode bestimmt, die in Kapitel 3 beschrieben werden.

2.2.1 Versuche mit unterschiedlichen Durchflüssen

Für jeden Versuch wurde ein konstanter Durchfluss eingestellt und der Wasserstand stromabwärts des Kieskörpers (Messpunkt 7) mit der Wehrklappe so eingestellt, dass die Messpunkte im Kieskörper unbeeinflusst waren, d.h. kein Rückstau im Messpunkt 6 vorlag. Sobald diese Höhe gefunden war und sich der Wasserstand entlang der Rinne eingestellt hatte (nach ca. 15 bis 30 Minuten), wurden die Messungen des Wasserstandes mithilfe der Messharfe durchgeführt.

Für Material 1 (8-32 mm) wurden fünf Durchflüsse ermittelt, bei denen der Wasserstand oberstrom des Kieskörpers zwischen ca. 25 cm und 45 cm lag. Für Material 2 (16-32 mm) wurden sechs Durchflüsse mit Wasserständen zwischen 20 cm und 45 cm eingestellt.

2.2.2 Versuche mit konstantem Durchfluss

Diese Versuche wurden durchgeführt, um zunächst die Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Versuchsdurchführung nachzuweisen. Weiterhin ermöglicht der Versuchsablauf, niedrigere hydraulische Gradienten einzustellen und die Datensätze dementsprechend zu erweitern.

Der Durchfluss wurde eingestellt und konstant gehalten. Die einzelnen Versuche ergaben sich aus unterschiedlichen Einstellungen der Wehrklappe. Der Durchfluss (0,6 l/s für Material 1 und 1,33 l/s für Material 2) und die höchste Wehrklappenstellung wurden so gewählt, dass der Wasserstand oberstrom des Kieskörpers (Messpunkt 1) in etwa auf Höhe der Kieskörperkrone (ca. 45 cm) lag. An Messpunkt 7 betrug der Wasserstand ca. 29 cm für Material 1 und ca. 39 cm für Material 2. Damit lag der niedrigste hydraulische Gradient bei ca. 0,001. In fünf weiteren Versuchen wurde die Wehrklappe abgesenkt, so dass die Wasserstände am Messpunkt 7 sanken. Da der Durchfluss konstant gehalten wurde, sanken auch die Wasserstände an Messpunkt 1. Nach jeder Einstellung der Wehrklappe wurde gewartet, bis sich die Wasserspiegellage innerhalb des Kieskörpers eingestellt hatte (ca. 15 bis 20 Minuten). Anschließend wurden die Wasserstände an den sieben Messpunkten gemessen.

3 Methoden zur Berechnung der k_f -Werte

Die k_f -Werte wurden aus den Wasserstandsmessungen unter Verwendung einer linearen und einer nichtlinearen Methode berechnet. Die lineare Methode geht von einer linearen Abnahme der Druckhöhe über einer Fließstrecke von 2 m in der Mitte des Kieskörpers aus (Methode vom upi-UmweltProjekt wie im Bericht LWI-1027 vorgeschlagen). Die nichtlineare Methode löst die Darcy-Differenzialgleichung in Längsrichtung der Rinne, was zu einem parabelförmigen Wasserspiegelprofil führt. Diese letztere Methode wurde verwendet, um Unsicherheiten zu überwinden, die aus der Annahme eines linearen Verlaufs des Wasserspiegels in der linearen Methode resultieren können. Die Grundlagen der beiden Methoden werden im folgenden Kapitel beschrieben.

3.1 Grundlagen

Das Darcy-Gesetz lautet

$$v = -k_f I \quad (1)$$

mit v = Darcy-Geschwindigkeit in [m/s], k_f = Durchlässigkeitsbeiwert in [m/s] und I = hydraulischer Gradient [1]. Die Darcy-Gleichung (Gl. 1) ist nur für laminare Grundwasserströmungen gültig.

Die Kontinuitätsgleichung lautet

$$Q = vA \quad (2)$$

mit Q = Durchfluss in [m³/s] und A = Durchflussquerschnitt in [m²] normal zur Fließrichtung. Für einen konstanten Durchfluss gilt

$$dQ / dx = 0 \quad (3)$$

mit x = Koordinate in Fließrichtung.

3.2 Lineare Methode zur Berechnung der k_f -Werte

Bei dieser Methode wird angenommen, dass der Wasserstand über die Länge des Messvolumens linear abnimmt. Das Energieliniengefälle ist das durchschnittliche Gefälle über das Messvolumen. Ebenso ist der Strömungsquerschnitt der Durchschnitt über dieses Volumen. Gefälle und Querschnittsfläche sind definiert als:

$$I = (h_5 - h_3) / L_{5-3} \quad (4)$$

$$A = b(h_5 + h_3) / 2 \quad (5)$$

mit h_5 und h_3 = Wassertiefen im Messpunkt 5 und 3, L_{5-3} = Länge vom Messpunkt 5 bis zum Messpunkt 3 (= 2 m) und b = Breite der Rinne (= 0,1 m).

Mit der Kombination der Gleichungen 1 bis 5 kann der k_f -Wert wie folgt berechnet werden:

$$k_f = \frac{Q}{\left(\frac{b(h_5 - h_3)(h_3 + h_5)}{2L_{5-3}} \right)} \quad (6)$$

3.3 Nichtlineare Methode zur Berechnung der k_f -Werte

Die Darcy-Gleichung (Gl. 1) und die Kontinuitätsgleichung (Gl. 2) können wie folgt kombiniert werden:

$$\left. \begin{array}{l} v = -k_f \frac{dh}{dx} \\ Q = bhv \end{array} \right\} \rightarrow Q = -bhk_f \frac{dh}{dx} = -bk_f \frac{1}{2} \frac{dh^2}{dx} \quad (7)$$

mit h = Wassertiefe in [m]. Um k_f aus den experimentellen Messungen zu berechnen, kann Gl. (7) wie folgt umgeschrieben werden

$$k_f = -2 \frac{Q}{b} \left(\frac{dh^2}{dx} \right)^{-1} \quad (8)$$

Q , k_f und b sind konstant. Daher nimmt das Quadrat der Wassertiefe bei einem ungesättigten Grundwasserleiter linear ab.

Für die Anwendung der Gl. (8) wurde das Quadrat der Wassertiefen (h^2) über die x -Koordinate aufgetragen und die Regressionsgerade bestimmt. Das Gefälle der Regressionsgeraden ist gleich der ersten Ableitung von h^2 in Bezug auf x (dh^2/dx).

4 Ergebnisse

4.1 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tab. 2 bis 5 angegeben. Jede Zeile in den Tabellen entspricht einem Messpunkt entlang der Rinne, während die Versuche in den Spalten angegeben sind. Die Wassertiefen h sind relativ zum horizontalen Rinnenboden. Die Messpunkte 1 und 7 geben die Randbedingungen für den Wasserstand vor bzw. hinter dem Kieskörper wieder, während die Messpunkte 2 bis 6 im Kieskörper lagen. Die Nummerierung ist stromabwärts aufsteigend.

Die Variation der Wassertiefe entlang der Rinne ist in Abb. 3 für zwei Versuche mit vergleichbaren Durchflüssen und den beiden untersuchten Materialien dargestellt. Die Wasserspiegellagen für alle Versuche sind in Abb. 4 dargestellt.

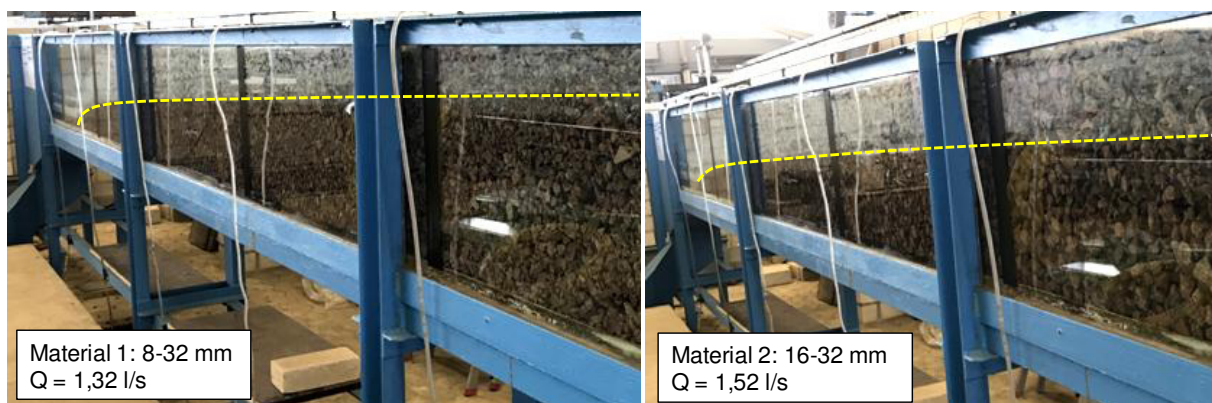


Abb. 3: Profil des Wasserspiegels im Kieskörper. Gegenüberstellung von Versuchen mit Material 1 und Material 2 bei entsprechenden Durchflüssen. Die gestrichelte Linie zeigt die Wasserspiegellage

Tab. 2 Ergebnisse der Messungen für Material 1 bei verschiedenen Durchflüssen

Material 1: 8-32 mm						
Versuch =		1	2	3	4	5
Q [l/s] =		1,98	1,68	1,32	1,00	0,80
Punkt	x [m]	h [m]				
1	0	0,4273	0,3843	0,3282	0,2731	0,2399
2	1	0,4224	0,3782	0,3223	0,2675	0,2346
3	2	0,3860	0,3448	0,2938	0,2444	0,2146
4	3	0,3355	0,3007	0,2567	0,2136	0,1877
5	4	0,2747	0,2470	0,2113	0,1753	0,1542
6	5	0,1670	0,1510	0,1406	0,1093	0,0971
7	5,9	0,0563	0,0521	0,0451	0,0269	0,0288

Tab. 3 Ergebnisse der Messungen für Material 2 bei verschiedenen Durchflüssen

Material 2: 16-32 mm							
Versuch =		1	2	3	4	5	6
Q [l/s] =		2,88	2,49	2,00	1,52	0,94	0,60
Punkt	x [m]	h [m]					
1	0	0,4195	0,3825	0,3317	0,2787	0,2077	0,1597
2	1	0,4122	0,3741	0,3242	0,2719	0,2019	0,1551
3	2	0,3786	0,3453	0,2996	0,2518	0,1872	0,1442
4	3	0,3292	0,3005	0,261	0,2199	0,1641	0,1268
5	4	0,2764	0,2533	0,2196	0,1854	0,1387	0,1078
6	5	0,1818	0,1708	0,147	0,1359	0,0955	0,0987
7	5,9	0,0677	0,0774	0,0565	0,047	0,0405	0,0364

Tab. 4 Ergebnisse der Messungen für Material 1 bei einem konstanten Durchfluss

Material 2: 8-32 mm (konstanter Durchfluss Q=0,6 l/s)							
Versuch =		1	2	3	4	5	6
h_7 [m] =		0,2936	0,1954	0,2466	0,2782	0,0935	0,2717
Punkt	x [m]	h [m]					
1	0	0,3305	0,2563	0,2933	0,3166	0,2111	0,3099
2	1	0,3285	0,2533	0,2906	0,3153	0,2063	0,3080
3	2	0,3211	0,2424	0,2815	0,3076	0,1905	0,3001
4	3	0,3123	0,2292	0,2712	0,2985	0,1700	0,2910
5	4	0,3040	0,2155	0,2610	0,2896	0,1454	0,2824
6	5	0,2951	0,1994	0,2491	0,2800	0,1103	0,2730

Tab. 5 Ergebnisse der Messungen für Material 2 bei einem konstanten Durchfluss

Material 2: 16-32 mm (konstanter Durchfluss Q=1,33 l/s)							
Versuch =		1	2	3	4	5	6
h_7 [m] =		0,3891	0,3381	0,2704	0,1836	0,0784	0,0197
Punkt	x [m]	h [m]					
1	0	0,4290	0,3879	0,3370	0,2874	0,2598	0,2579
2	1	0,4275	0,3852	0,3332	0,2821	0,2533	0,2511
3	2	0,4201	0,3760	0,3221	0,2673	0,2351	0,2329
4	3	0,4101	0,3635	0,3060	0,2445	0,2061	0,2034
5	4	0,4011	0,3533	0,2924	0,2232	0,1754	0,1714
6	5	0,3911	0,3411	0,2756	0,1949	0,1245	0,1172

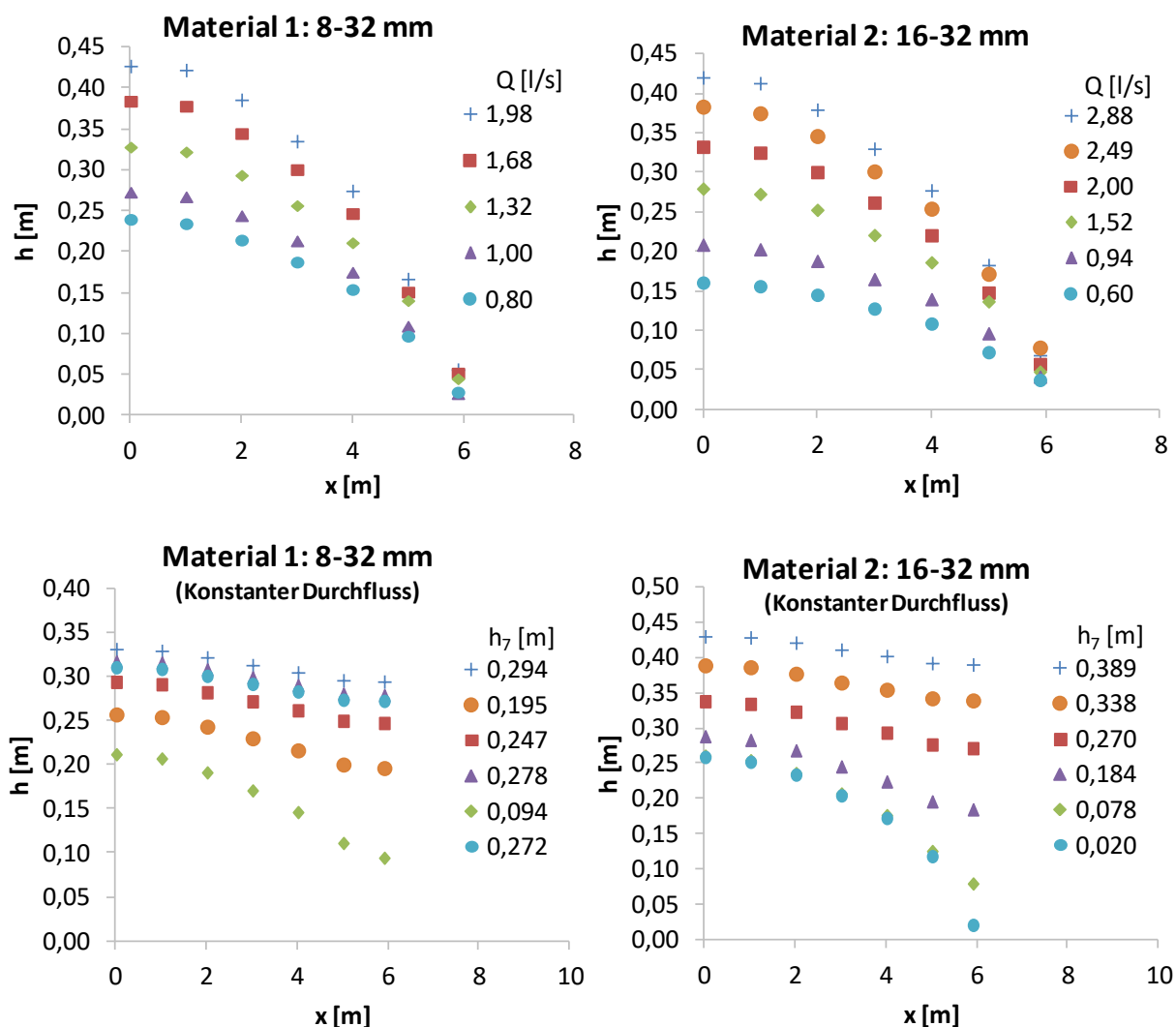


Abb. 4: Verlauf der Wassertiefe entlang der Rinne in den vier Versuchsreihen

4.2 Ermittlung der k_f -Werte

Die Durchlässigkeit des Kiesmaterials wurde unter Verwendung der in Kapitel 3 vorgestellten Methoden mithilfe der gemessenen Wassertiefen h (Tab. 2 bis 5) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 dargestellt, in welcher zusätzlich die durchschnittlichen hydraulischen Gradienten I angegeben sind. Die durchschnittlichen hydraulischen Gradienten wurden aus den Wasserständen in den Messpunkten 2 und 6 und deren Abstand berechnet.

Der Verlauf von h^2 entlang der Rinne in den drei Versuchsreihen und die entsprechenden Regressionsgeraden, die für die Anwendung der nichtlinearen Methode benötigt werden, sind in Abb. 5 dargestellt. Die Regressionsgeraden sind nahezu identisch mit den Datenpunkten (Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,99$). Dies bestätigt den parabelförmigen Verlauf des Wasserspiegels, welcher durch die in Kapitel 3.3 vorgestellte Theorie (Gl. 8) erwartet wurde (siehe auch die Profile des Wasserspiegels in Abb. 3).

Alle berechneten k_f -Werte sind in Abb. 6 als Funktion des hydraulischen Gradienten dargestellt. Die lineare Methode ergab systematisch niedrigere k_f -Werte als die nichtlineare

Methode mit einem durchschnittlichen Unterschied von 0,024 m/s bzw. 0,055 m/s für Material 1 resp. Material 2.

Wie aus Abb. 6 ersichtlich ist, sind die Ergebnisse unabhängig vom Versuchsablauf (verschiedene Durchflüsse bzw. konstanter Durchfluss mit verschiedenen Wehrklappenstellungen).

Für Material 2 überlappen sich die beiden Datensätze für hydraulische Gradienten zwischen 0,014 und 0,033 und bilden gemeinsam den Datensatz für $I = 0,009$ bis 0,058 ab. Dieses Ergebnis zeigt zunächst, dass die unterstromige Randbedingung, d.h. die Wehrklappenstellung, keinen Einfluss auf die Beziehung zwischen k_f und I hat. Weiterhin wird deutlich, dass der Zusammenhang zwischen k_f und I linear ist. Allerdings ist die Proportionalitätskonstante abhängig vom Betrag des hydraulischen Gradienten: für $I < 0,02$ ist die Steigung größer als für den Bereich $I > 0,02$ bis 0,06.

Für Material 1 wurden hydraulische Gradienten im Bereich $I = 0,008$ bis 0,064 eingestellt. Auch für Material 1 zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert und dem hydraulischen Gradienten mit einer Änderung der Steigung bei $I = 0,02$. Die Änderung ist weniger stark als bei Material 2.

Die Durchlässigkeit von Material 2 ist, bei gleichem hydraulischen Radius, größer als die Durchlässigkeit von Material 1. Der Unterschied nimmt mit steigendem hydraulischen Gradienten ab.

Tab. 6 Ergebnisse der k_f -Werte

Versuch	Q [l/s]	h_7 [m]	I [m/m]	dh^2/dx [m]	lineare Methode - k_f [m/s]	nichtlineare Methode - k_f [m/s]
Material 1: 8-32 mm						
1	1,98	0,0898	0,064	0,0345	0,36	0,38
2	1,68	0,0856	0,057	0,0275	0,39	0,41
3	1,32	0,0786	0,045	0,0198	0,42	0,44
4	1,00	0,0604	0,040	0,0137	0,46	0,49
5	0,80	0,0623	0,034	0,0105	0,48	0,51
Material 2: 16-32 mm						
1	2,88	0,1012	0,058	0,0256	0,57	0,61
2	2,49	0,1109	0,051	0,0316	0,60	0,65
3	2,00	0,0900	0,044	0,0192	0,64	0,69
4	1,52	0,0805	0,034	0,0134	0,70	0,76
5	0,94	0,0740	0,027	0,0073	0,79	0,86
6	0,60	0,0699	0,014	0,0042	0,87	0,95
Material 1: 8-32 mm (konstanter Durchfluss)						
1	0,60	0,2936	0,008	0,0052	0,75	0,77
2	0,60	0,1954	0,013	0,0059	0,65	0,68
3	0,60	0,2466	0,010	0,0055	0,72	0,73
4	0,60	0,2782	0,009	0,0052	0,74	0,77
5	0,60	0,0935	0,024	0,0072	0,53	0,56
6	0,60	0,2717	0,009	0,0051	0,78	0,78
Material 2: 16-32 mm (konstanter Durchfluss)						
1	1,33	0,3891	0,009	0,0074	1,14	1,20
2	1,33	0,3381	0,011	0,0080	1,07	1,11
3	1,33	0,2704	0,014	0,0087	0,97	1,02
4	1,33	0,1836	0,022	0,0101	0,82	0,88
5	1,33	0,0784	0,032	0,0113	0,72	0,78
6	1,33	0,0197	0,033	0,0114	0,71	0,78

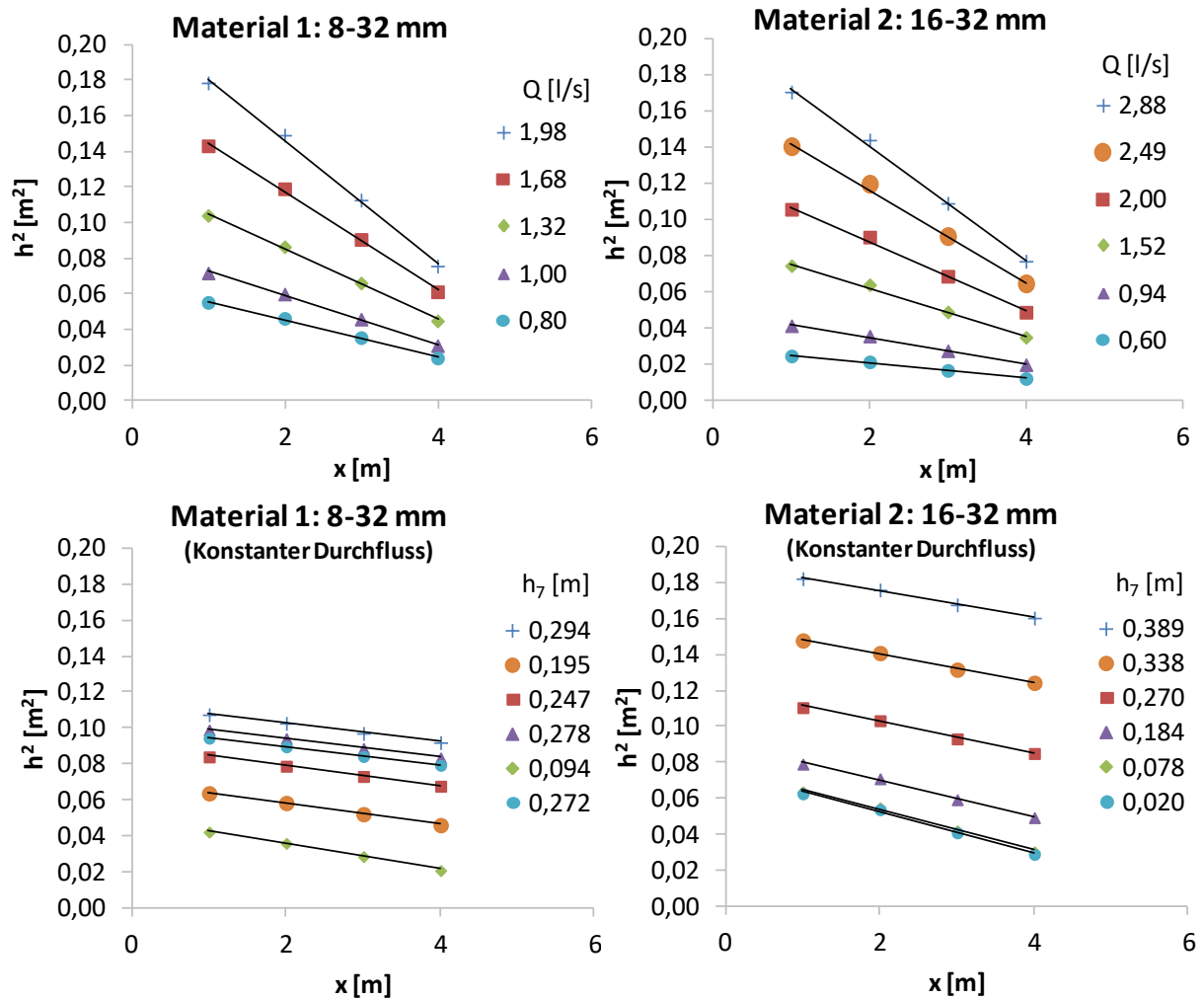


Abb. 5: Verlauf des Quadrats der Wassertiefe entlang der Rinne in den vier Versuchsreihen. Regressionsgeraden sind in schwarz dargestellt

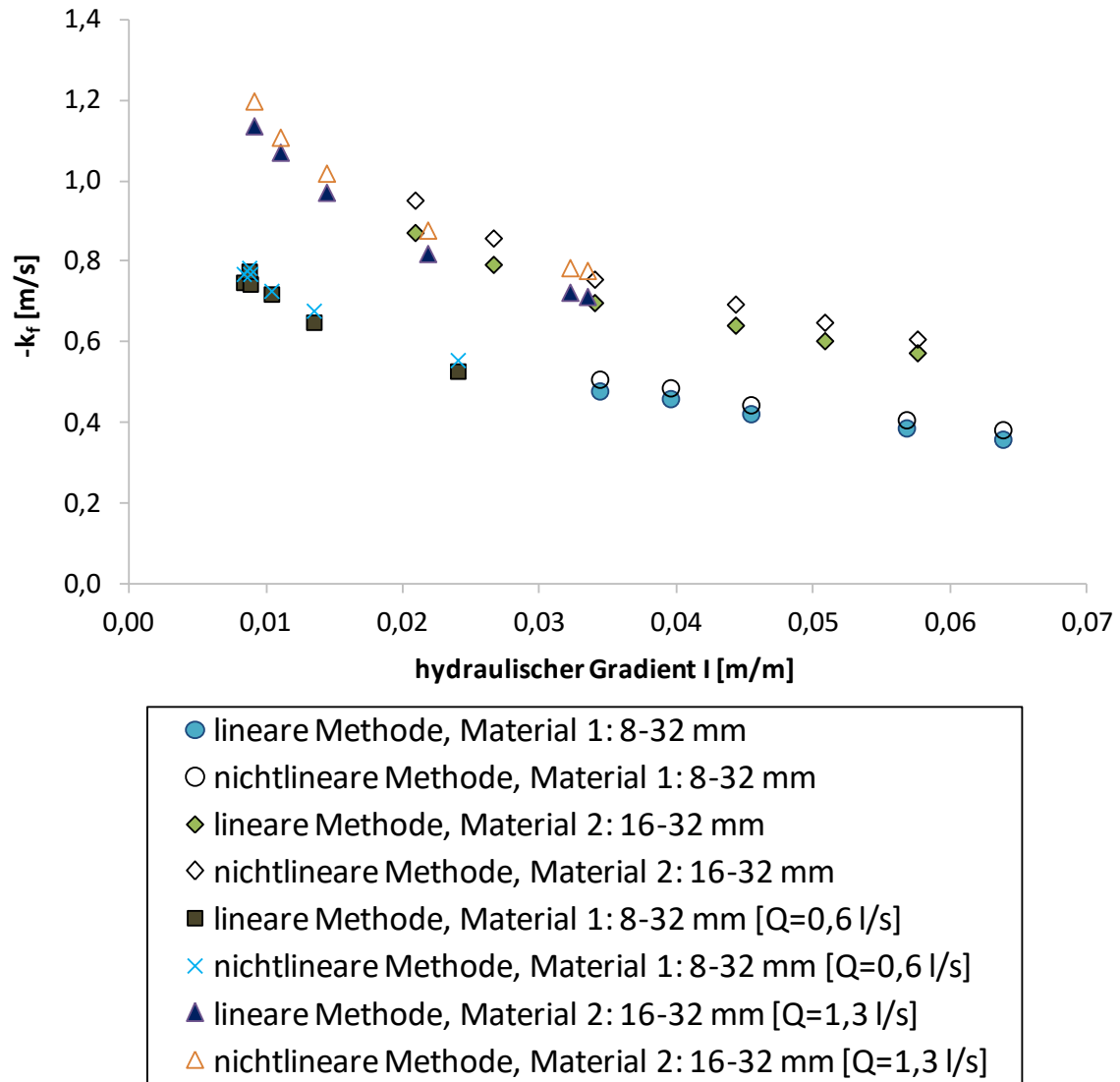


Abb. 6: Berechnete k_f -Werte für alle Versuche und die zwei verwendeten Berechnungsmethoden

4.3 Abhängigkeit vom hydraulischen Gradienten und Vergleich mit anderen Datensätzen

Wie im LWI-Bericht Nr. 1027 beschrieben wurde, ist für einen bestimmten hydraulischen Gradienten aufgrund der zusätzlichen Energieverluste, die durch turbulente Strömungen verursacht werden, der Durchfluss in einem Kieskörper geringer, als nach dem Darcy-Gesetz erwartet. Das Darcy-Gesetz ist gültig für laminare Strömung (d.h. viskose Kräfte dominieren), die in einer Kiesschicht aufgrund der relativ großen Poren zwischen den Partikeln nicht gegeben ist. Folglich nimmt bei turbulenter Durchströmung die Durchlässigkeit mit zunehmendem hydraulischem Gefälle ab. Die Versuche bestätigen diese Annahme (Abb. 6).

Um die Auswirkung größerer hydraulischer Gradienten auf k_f zu zeigen, sind in der Literatur gefundene und bereits in LWI-1027 (2012) angegebene Daten mit den neuen experimentellen Ergebnissen in Abb. 7 dargestellt. Zum Vergleich wurden auch die Ergebnisse aus LWI-1027 (2012) in derselben Grafik visualisiert. Die Literaturdaten wurden Mulqueen (2005) entnommen und entstammen Grundwasserströmungsexperimenten für einen weit gefächerten Bereich von hydraulischen Gradienten mit zwei verschiedenen Materialien. Das erste Material weist Korngrößen zwischen 9 und 19 mm und das zweite einen mittleren Durchmesser von 25 mm auf. In LWI-1027 (2012) wurde der Durchlässigkeitsbeiwert von Brechkorn mit Korngrößen von 8-16 mm, 32-64 mm und einer Mischung dieser beiden ermittelt.

Die logarithmische Auftragung der Ergebnisse in Abb. 7 zeigt, dass jedes Material vergleichbare Trends mit einem ähnlichen Gradienten für die Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwerts mit I aufweisen. Daten aus LWI-1027 (2012) für 8-16 mm und die Mischung 8-16/32-64 mm fallen mit den neuen Daten für Material 1 (8-32 mm) zusammen. Dies deutet darauf hin, dass die feineren Korngrößenfraktionen die Durchlässigkeitseigenschaften bestimmen. Die Durchlässigkeitsbeiwerte von Material 2 der neuen Versuche (16-32 mm) liegen etwa zwischen diesen feinen und den grobkörnigen Materialien (32-64 mm Brechkorn und $D_m = 25$ mm). Dies könnte auf eine nahezu lineare Proportionalität zwischen k_f und der feinsten Korngröße der Materialien hinweisen.

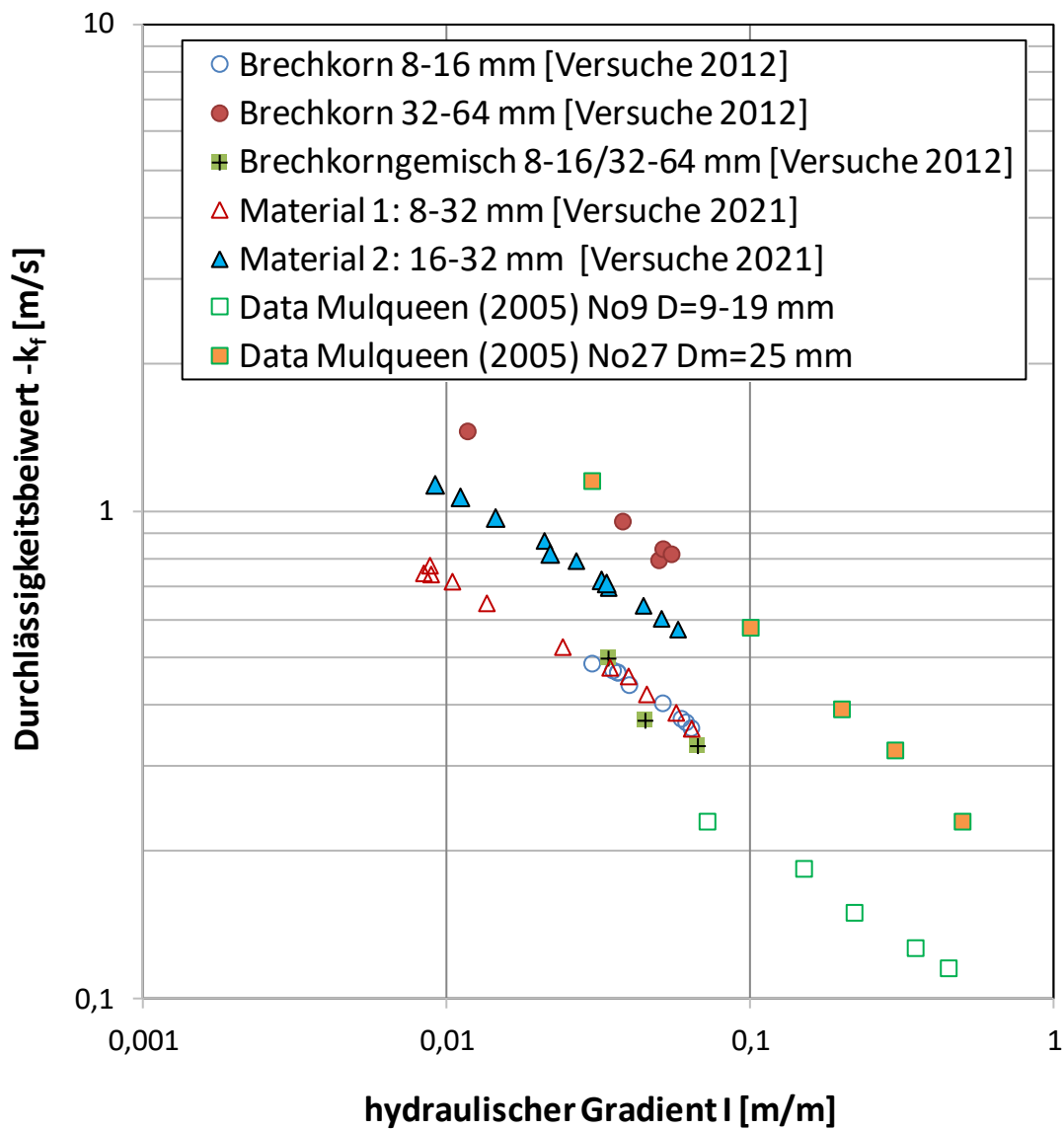


Abb. 7: Vergleich der berechneten k_f -Werte mit der linearen Methode für alle Versuche mit den Ergebnissen aus LWI-1027 (2012) und den Daten von Mulqueen (2005)

5 Zusammenfassung

Um die Durchlässigkeit zweier Materialien für unterschiedliche hydraulische Gradienten zu bestimmen, wurde eine Reihe von Laborversuchen in einer hydraulischen Rinne durchgeführt. Die getesteten Materialien waren Kies Porphy, gebrochen, mit Korngrößen von 8 bis 32 mm bzw. 16 bis 32 mm.

Die gemessene Durchlässigkeit (k_f -Werte) variierte zwischen 0,36 und 1,14 m/s für hydraulische Gradienten zwischen 0,008 und 0,064 m/m. Die Durchlässigkeitsbeiwerte von Material 2 sind, bei gleichem hydraulischen Radius, größer als die Durchlässigkeitsbeiwerte von Material 1. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Durchlässigkeit mit steigendem hydraulischen Gradienten abnimmt. Dies wird durch die angegebenen Ergebnisse in dem LWI-Bericht Nr. 1027 (2012) für weitere grobe Materialien bestätigt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass der Unterschied zwischen den untersuchten Materialien mit steigendem hydraulischen Gradienten abnimmt.

6 Literaturverzeichnis

- LWI-1027 (2012): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes von Brechkorn Basalt. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Auftraggeber: upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH, Bericht 1027
- Mulqueen, J. (2005): The flow of water through gravels, Irish Journal of Agricultural and Food Research Vol. 44(1)