

# **Experimentelle Untersuchung der Anströmung von Vertikalfilterbrunnen**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades einer  
Doktorin der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Wiebke Solveigh Klauer

Berichter:     Universitätsprofessor Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf  
                  Honorarprofessor Dr.rer.nat. Christoph Treskatis  
                  apl. Professor Dr.-Ing. Christian Forkel

Tag der mündlichen Prüfung: 21.12.2010

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

## Kurzfassung

Brunnen sind unterirdische Bauwerke zur Fassung und Förderung von Grundwasser und leisten damit einen wichtigen Beitrag zur globalen Versorgung mit Trinkwasser und zur landwirtschaftlichen und industriellen Produktion. Die Berechnung der in den Brunnen strömenden Wassermenge und des sich daraus einstellenden Absenkungstrichters beruht auf vereinfachenden Annahmen im Modellsystem, die jedoch im direkten Brunnennahbereich aufgrund des steilen Gradienten häufig nicht zutreffen. Unterschiede zwischen theoretischer Berechnung und gemessenen Absenkungen werden bisher durch empirische Verlustbeiwerte berücksichtigt.

Aufbauend auf umfangreichen experimentellen Untersuchungen der Brunnenanströmung im Nahbereich wird daher im Rahmen dieser Arbeit ein analytisches Gesamtmodell zur Beschreibung der Strömungsprozesse unter Berücksichtigung aller Verlustkomponenten bei gespannten Verhältnissen abgeleitet. Die Besonderheit besteht dabei in der Berücksichtigung verschiedener Fließregime, verschiedener durchströmter Materialien sowie möglicher Prozesse an den Trennflächen zwischen den Materialien.

Daher werden zunächst die regimeabhängigen Widerstandsgesetze zur Durchströmung poröser Medien vorgestellt, diskutiert und auf die Verhältnisse eines radialen Strömungssystems in Form der Brunnenanströmung übertragen. Die Vorstellung und Auswertung der systematischen Brunnenmodellversuche mit einer Variation der durchströmten Materialien in einer eigens hierfür konzipierten zylindrischen Versuchsanlage liefert anschließend die Grundlage zur Bestimmung der Widerstands-Koeffizienten der Einzelmaterialien. Ein Vergleich mit Koeffizienten aus anderen Untersuchungen zeigt die Variabilität dieser Koeffizienten, die bei der eigenen Untersuchung durch eine probabilistische Betrachtungsweise berücksichtigt wird.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit bestehen in der prozessbasierten Gesamtbeschreibung der Brunnenanströmung als analytisches Modell auf der Grundlage der ermittelten Widerstands-Koeffizienten. Das Modell wird abschließend für ein Anwendungsbeispiel an einem Brunnen in der Tagebautwässerung verwendet, um die Auswirkung einzelner Parameter auf den Gesamtdruckverlust bewerten zu können. In Praxisversuchen im Tagebau werden erste Erkenntnisse aus den Brunnenmodellversuchen bereits umgesetzt und zeigen ein positives Ergebnis bei Förderleistungsvergleichen.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	XII
Symbolverzeichnis.....	XVI
<b>1 Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
1.3 Begriffsdefinitionen.....	4
<b>2 Grundlagen der Strömung im porösen Medium.....</b>	<b>6</b>
2.1 Vorbemerkungen.....	6
2.2 Bewegung im Porenraum.....	7
2.2.1 Eigenschaften des porösen Mediums.....	7
2.2.2 Eigenschaften der Strömung.....	12
2.2.3 Betrachtungsmaßstäbe für die Strömung im porösen Medium.....	13
2.3 Ansätze zur Beschreibung der Strömung im porösen Medium.....	18
2.3.1 Strömung im linear laminaren Regime.....	18
2.3.2 Strömung im nichtlinear laminaren Regime.....	20
2.3.3 Strömung im turbulenten Regime.....	25
2.4 Zusammenfassung und Bewertung.....	26
<b>3 Grundlagen der Brunnenanströmung.....</b>	<b>29</b>
3.1 Vorbemerkungen.....	29
3.2 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs.....	29
3.3 Anströmung aus dem Aquifer in verschiedenen Regimebereichen.....	30
3.3.1 Linear laminarer Regimebereich.....	31
3.3.2 Nichtlinear laminarer Regimebereich.....	34
3.3.3 Turbulenter Regimebereich.....	35
3.4 Strömungsverhältnisse im Schüttmaterial.....	36
3.5 Strömungsverhältnisse im Filterrohr.....	39
3.5.1 Filterrohr als poröses Medium.....	40
3.5.2 Filterrohröffnungen als Lochblende.....	43
3.5.3 Strömungsbeeinflussung durch die Filterrohröffnungen.....	46
3.6 Berücksichtigung der Trennflächenwiderstände.....	47
3.6.1 Hydromechanische Bodendeformation.....	48
3.6.2 Berücksichtigung des Skineffektes.....	50
3.6.3 Modellversuche zum Brunnengesamtsystem.....	54

3.7	Präzisierung der Zielsetzung und der methodischen Vorgehensweise.....	57
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der Brunnenanströmung .....</b>	<b>61</b>
4.1	Vorbemerkungen .....	61
4.2	Modellkonzept .....	61
4.3	Verwendete Materialien .....	64
4.4	Messtechnik .....	67
4.4.1	Druckmessung .....	67
4.4.2	Temperaturmessung .....	69
4.4.3	Durchflussmessung.....	70
4.5	Messablauf und die Messung beeinflussende Parameter .....	71
4.5.1	Messzyklus.....	71
4.5.2	Einfluss der Temperatur .....	71
4.5.3	Einfluss der Luft .....	71
4.6	Geotechnische Untersuchungen .....	72
4.6.1	Bestimmung der Lagerungsdichte.....	72
4.6.2	Bestimmung der Korngrößenverteilung.....	74
4.7	Modelleffekte .....	75
4.7.1	Sicherstellung gleichbleibender Versuchsrandbedingungen .....	77
4.7.2	Untersuchung des Materialverhaltens bei Durchflusssteigerung.....	79
4.7.3	Einfluss der Aquifermaterialsichtdicke auf den Brunnenausbauwiderstand.....	80
4.8	Untersuchungsprogramm .....	83
<b>5</b>	<b>Phänomenologische Beschreibung der Prozesse im Brunnennahbereich .....</b>	<b>86</b>
5.1	Vorbemerkungen .....	86
5.2	Untersuchung der Filterrohrdurchlässigkeit .....	86
5.3	Einfluss des Filterkieses auf den Brunnenausbauwiderstand.....	88
5.3.1	Einfluss des Unterkorngehaltes.....	88
5.3.2	Einfluss der Ungleichförmigkeit und der Kornform .....	89
5.3.3	Einfluss der Korngruppe.....	90
5.4	Einfluss des Filterrohrs auf den Brunnenausbauwiderstand.....	94
5.4.1	Einfluss der Öffnungsweite.....	94
5.4.2	Einfluss der Öffnungsform.....	96
5.4.3	Einfluss der Kiesbeklebung .....	98
5.4.4	Einfluss des Filterrohrtyps.....	101
5.5	Bewertung und Schlussfolgerungen .....	102
<b>6</b>	<b>Theoretische Beschreibung der Strömungsprozesse im Brunnennahbereich bei gespannten Verhältnissen .....</b>	<b>105</b>
6.1	Vorbemerkungen .....	105
6.2	Ermittlung der Reynoldszahlen für die Einzelkomponenten.....	105
6.2.1	Aquifermaterial .....	106
6.2.2	Filterkies.....	108

6.2.3	Filterrohr.....	109
6.2.4	Festlegung der Regimebereiche .....	111
6.3	Bestimmung der Materialparameter für die Einzelkomponenten .....	112
6.3.1	Aquifermaterial .....	112
6.3.2	Filterkies.....	116
6.3.3	Filterrohr.....	119
6.3.4	Vergleich der Koeffizienten mit Literaturwerten.....	120
6.3.5	Schlussfolgerungen und Bewertung.....	129
6.4	Zusammenführung zum Gesamtsystem mit Analyse der Trennflächen.....	130
6.4.1	Berechnung der Drucklinie für das Gesamtsystem .....	130
6.4.2	Überprüfung hydromechanischer Bodendeformationen .....	134
6.4.3	Berechnung der Trennflächendruckdifferenzen .....	135
6.5	Gesamtmodell der Brunnenanströmung bei gespannten Verhältnissen .....	140
<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiel .....</b>	<b>144</b>
7.1	Vorbemerkungen .....	144
7.2	Brunnengeometrie .....	145
7.3	Anwendung des Gesamtmodells .....	147
7.3.1	Variation der Bohrlochgeometrie.....	149
7.3.2	Variation der Brunnenausbaumaterialien .....	151
7.3.3	Variation der Porosität.....	153
7.3.4	Variation der Entnahmemenge.....	155
7.3.5	Variation der Skinzonendurchlässigkeit.....	156
7.4	Bewertung .....	157
7.5	Praxisversuche .....	158
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>163</b>
8.1	Zusammenfassung .....	163
8.2	Wichtige Erkenntnisse .....	163
8.3	Forschungsbedarf.....	165
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>168</b>
<b>A</b>	<b>Versuchsergebnisse.....</b>	<b>180</b>
<b>B</b>	<b>Einzelergebnisse der ERGUN-Koeffizienten.....</b>	<b>214</b>
<b>C</b>	<b>Trennflächendruckdifferenzen .....</b>	<b>217</b>
<b>D</b>	<b>Reynoldszahlen Anwendungsbeispiel.....</b>	<b>218</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>219</b>
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>220</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Vertikalfilterbrunnen im gespannten Grundwasserleiter .....	5
Abbildung 1.2:	Gesättigte und ungesättigte Zone nach DIN 4049-3 (1994) .....	5
Abbildung 2.1:	Tortuose Pfade durch ein poröses Medium mit der kürzesten Länge $L_k$ und der Bahnlänge $L_b$ , exemplarisch an einem vergrößerten Kugelmodell dargestellt .....	8
Abbildung 2.2:	Beispielkornverteilungen eines Aquifermaterials mit Angabe der Ungleichförmigkeit $U$ ..	9
Abbildung 2.3:	Beispiel eines porösen Mediums (links) mit mikroskopischer Darstellung der unregelmäßigen Kornform (rechts) .....	10
Abbildung 2.4:	Darstellung der verschiedenen Porenraummodelle zur Abbildung der porösen Matrix ..	11
Abbildung 2.5:	Mikroskopischer und makroskopischer Betrachtungsmaßstab mit Definition des repräsentativen Elementarvolumens (REV), verändert nach BEAR (1972) .....	12
Abbildung 2.6:	Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität und der Dichte von Wasser .....	13
Abbildung 2.7:	Hydraulischer Gradient $i$ und spezifischer Durchfluss $v_f$ in den verschiedenen Regimebereichen linear laminar, turbulent und nichtlinearer laminarer Übergangsbereich, verändert nach FREEZE & CHERRY (1979) .....	15
Abbildung 2.8:	Beziehung zwischen dem Widerstandsbeiwert und der Reynoldszahl in logarith- mischer Darstellung für die Strömung durch poröse Medien, verändert nach ROSE (1945) .....	16
Abbildung 2.9:	Darstellung der FORCHHEIMER-Gleichung mit der Bedeutung der FORCHHEIMER- Koeffizienten $a_F$ und $b_F$ .....	21
Abbildung 2.10:	Mikroskopbilder von gleichförmigen Glaskugeln (links) und ungleichförmigen porösen Medium (rechts) bei unterschiedlichen Vergrößerungsverhältnissen .....	24
Abbildung 3.1:	Schnitt durch einen Brunnen mit Darstellung der Zuströmung im gespannten Grund- wasserleiter mit ruhendem und abgesenktem Grundwasserspiegel sowie dem Bohrlochausbau mit Schüttmaterial und Filterrohr .....	30
Abbildung 3.2:	Definitionsskizze der Anströmung zum Brunnen bei gespannten (links) und ungespannten (rechts) Grundwasserverhältnissen .....	31
Abbildung 3.3:	Zuströmung zum Brunnen im Nahbereich mit Eintritt in die Schüttmaterialschicht für gespannte Verhältnisse .....	37
Abbildung 3.4:	Zuströmung zum Brunnen im Nahbereich mit Eintritt in die Schüttmaterialschicht für ungespannte Verhältnisse .....	38
Abbildung 3.5:	Modellvorstellungen zum Strömungswiderstand eines Filterrohres bei Durchströmung .....	40
Abbildung 3.6:	Vertikaler Schnitt durch die Filterrohrwand zur Berechnung der Filterrohr- durchlässigkeit $k_{FR}$ als poröses Medium .....	41
Abbildung 3.7:	Horizontale Durchströmung eines Bohrlochs mit Filterrohr und Schüttmaterial im homogenen Grundwasserleiter mit der Darstellung der Stromlinienverzerrung und des vertikalen Schnitts durch das Bohrloch, verändert nach KOCH et al. (1967) .....	42
Abbildung 3.8:	Filterwiderstandskoeffizient als Funktion von Filterrohrparametern $C_p$ , $L_{FR}$ und $D_{FR}$ nach PETERSEN et al. (1955) .....	45

Abbildung 3.9: Vergleich zwischen einem kreisgelochten (rechts) und einem gewickelten (links) Filterrohr mit der Darstellung der Stromlinienbeeinflussung durch die Filterrohröffnungen .....	46
Abbildung 3.10: Schematische Beeinflussung der Strömungsbahnen durch die Spaltgeometrie, rechts für ein Filterrohr mit horizontaler Schlitzlochung und links für ein Filterrohr in Wickeldrahttechnik, verändert nach TRESKATIS et al. (1998) .....	47
Abbildung 3.11: Sprunghafter Wechsel der Durchlässigkeit an einer Trennfläche mit Darstellung der Stromlinie .....	48
Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der inneren Suffosion, Kontaktsuffosion und Kontakt-erosion für horizontale Strömungsprozesse, verändert nach ZIEMS (1969) .....	49
Abbildung 3.13: Strömungsfeld am Brunnen im gespannten Aquifer mit Darstellung der Skinzone und dem daraus resultierenden Skineffekt als zusätzlicher Druckverlust .....	50
Abbildung 3.14: Filterkuchenbildung (rechts) zwischen Aquifermaterial und Filterkies bei einem freiliegenden Entwässerungsbrunnen (links) im Tagebau Garzweiler .....	51
Abbildung 3.15: Hydraulischer Gradient $dh/dr$ im Verhältnis zur Reynoldszahl $Re$ nach Versuchsergebnissen von WILLIAMS (1985) .....	56
Abbildung 3.16: Vergleich der Strömungsgeometrien zwischen einfachen Säulenversuchen (links) und komplexen radialen Brunnenausschnittsmodellen (rechts) .....	57
Abbildung 3.17: Darstellung der Gradienten $i$ für verschiedene Radien $r$ bei konvergierender Strömung.....	59
Abbildung 4.1: Versuchsstand mit den Komponenten Betriebsbehälter, Hochbehältersäule, Versuchsbehälter, Druckentlastung, Messwehrkanal und THOMSON-Wehr .....	62
Abbildung 4.2: Darstellung der radialen Anströmung aus dem Wassermantel in das Aquifermaterial bei einem beispielhaften Brunneneinbau im Versuchsbehälter mit Filterrohr, Filterkies und Aquifermaterial.....	62
Abbildung 4.3: Schematische Übersicht mit Darstellung und Bezeichnung der einzelnen Komponenten .....	63
Abbildung 4.4: Sieblinien des verwendeten Aquifermaterials .....	65
Abbildung 4.5: Sieblinien der verwendeten Filterkiese .....	65
Abbildung 4.6: Darstellung der verschiedenen Filterrohrtypen für den Einsatz im Versuchsbehälter....	66
Abbildung 4.7: Druckanbohrungen an verschiedenen Radien auf der Messachse C im Versuchsbehälterboden für die Installation der Druckmesstechnik .....	68
Abbildung 4.8: Aufgebohrte Deckelmutter als Kappe für die Druckanbohrung.....	69
Abbildung 4.9: Normierter Durchfluss (links) und Wassertemperatur (rechts) während einer beispielhaften Versuchsanlaufphase .....	72
Abbildung 4.10: Ermittelte Lagerungsdichten des Filterkies und Aquifermaterials für alle Versuchskonfigurationen mit eingebautem Material.....	73
Abbildung 4.11: Ergebnisse der fünf Reihenversuche mit linearer Regressionsgerade für den Druckverlust des Brunnenausbauwiderstands in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss... 78	
Abbildung 4.12: Ergebnisse der fünf Reihenversuche mit linearer Regressionsgerade für den Druckverlust im Aquifermaterial in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss .....	79
Abbildung 4.13: Druckverlust im Aquifermaterial in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für drei Messzyklen beim Wiederholungsversuch mit Kiesstabfilter DN 400 und einer 1.4-2.2 mm Verkiesung bei einer Aquifermaterialschichtdicke von 345 mm.....	80

Abbildung 4.14: Druckverlust des Brunnenbaus dargestellt in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für den Kiesstabfilter bei drei verschiedenen Aquifermaterialsichtdicken .....	81
Abbildung 4.15: Druckverlust des Brunnenbaus dargestellt in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für den Scheibenfilter bei drei verschiedenen Aquifermaterialsichtdicken .....	81
Abbildung 4.16: Lineare Regressionsgeraden zwischen Druckverlust Brunnenbau und normiertem Durchfluss für Kiesstabfilter mit Kiesbeklebung 3-5 mm sowie Scheibenfilter mit Spaltweite 1.0 mm, jeweils mit 1.4-2.2 mm Verkiesung bei drei verschiedenen Aquifermaterialsichtdicken .....	82
Abbildung 5.1: Druckverlust (bezogen auf Filterrohrwanddicke) in Abhängigkeit von der Eintrittsgeschwindigkeit an der Filterrohrinnenseite für alle Filterrohre mit Kiesbeklebung .....	87
Abbildung 5.2: Druckverlust (bezogen auf Filterrohrwanddicke) in Abhängigkeit von der Eintrittsgeschwindigkeit an der Filterrohrinnenseite für alle Filterrohre ohne Kiesbeklebung .....	87
Abbildung 5.3: Druckverlust des Brunnenbaus mit Kieslochfilter und FK 0.7-1.4 mm in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für vier verschiedene Unterkorngehalte .....	89
Abbildung 5.4: Druckverlust des Brunnenbaus mit Kiesstabfilter und vier verschiedenen Filterkiesen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss zur Variation der Ungleichförmigkeit $U$ und der Kornform .....	90
Abbildung 5.5: Druckverlust des Brunnenbaus mit Kieslochfilter und drei verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss .....	91
Abbildung 5.6: Druckverlust des Brunnenbaus mit Kiesstabfilter und vier verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss .....	92
Abbildung 5.7: Druckverlust des Brunnenbaus mit Scheibenfilter und drei verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss .....	93
Abbildung 5.8: Druckverlust des Brunnenbaus mit Wickeldrahtfilter und drei verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss .....	93
Abbildung 5.9: Druckverlust des Brunnenbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Scheibenfilter mit unterschiedlichen Spaltweiten und 1.4-2.2 mm Verkiesung .....	95
Abbildung 5.10: Druckverlust des Brunnenbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Wickeldrahtfilter mit drei unterschiedlichen Schlitzweiten und 1.4-2.2 mm Verkiesung .....	96
Abbildung 5.11: Öffnungsformen beim Wickeldraht-, Schlitzbrücken- und Scheibenfilter mit einem nicht maßstabgetreuen Schnitt durch die Filterrohrwand (oben) und einer Nahaufnahme des jeweiligen Filterrohrs (unten) .....	97
Abbildung 5.12: Druckverlust des Brunnenbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Wickeldrahtfilter, Schlitzbrückenfilter und Scheibenfilter mit einer Öffnungsweite von 1.0 mm und einer Verkiesung mit 1.4-2.2 mm .....	98
Abbildung 5.13: Druckverlust des Brunnenbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Kiesstabfilter mit unterschiedlicher Kiesbeklebung und 1.4-2.2 mm Verkiesung .....	99
Abbildung 5.14: Druckverlust des Brunnenbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Kieslochfilter mit unterschiedlicher Kiesbeklebung und 1.4-2.2 mm Verkiesung .....	100
Abbildung 5.15: Druckverlust des Brunnenbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Schlitzbrückenfilter mit unterschiedlicher Kiesbeklebung und 1.4-2.2 mm Verkiesung .....	100

Abbildung 5.16: Druckverlust des Brunnenausbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jeden Filterrohrtyp als bestes Ergebnis bei 1.4-2.2 mm Verkiesung.....	101
Abbildung 6.1: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für alle Druckmessergebnisse im Aquifermaterial .....	107
Abbildung 6.2: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl mit Annahme linearer Regression für Druckmessergebnisse im Aquifermaterial zur Ermittlung $Re_{krit}$ .....	107
Abbildung 6.3: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für alle Druckmessergebnisse im Filterkies.....	108
Abbildung 6.4: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für Druckmessergebnisse im Filterkies zur Ermittlung $Re_{krit}$ .....	109
Abbildung 6.5: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für alle Druckmessergebnisse im Filterrohr .....	110
Abbildung 6.6: Dimensionslose Darstellung des Druckverlustes bezogen auf die Filterrohrwanddicke in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für Druckmessergebnisse im Filterrohr zur Ermittlung $Re_{krit}$ .....	110
Abbildung 6.7: Druckmesswerte in Abhängigkeit vom Radius für den gemessenen Durchflussbereich einer Versuchskonfiguration mit Angabe der Randbedingungen .....	113
Abbildung 6.8: Berechnete ERGUN-Koeffizienten $A_E$ für jede Versuchskonfiguration mit Aquifermaterial .....	114
Abbildung 6.9: Wahrscheinlichkeitsdichte und kumulative Verteilungsfunktion der ermittelten linearen ERGUN-Koeffizienten für das Aquifermaterial mit geschätzter Normalverteilung.....	115
Abbildung 6.10: Berechnete ERGUN-Koeffizienten $A_E$ und $B_E$ für Filterkiese und Glaskugeln als Filterkiese .....	118
Abbildung 6.11: Wahrscheinlichkeitsdichte und kumulative Verteilungsfunktion der ermittelten linearen und nichtlinearen ERGUN-Koeffizienten für die Filterkiese mit geschätzter Normalverteilung .....	118
Abbildung 6.12: Berechnete FORCHHEIMER-Koeffizienten $a_F$ und Literaturwerte für verschiedene Korndurchmesser .....	122
Abbildung 6.13: Berechnete FORCHHEIMER-Koeffizienten $b_F$ und Literaturwerte für verschiedene Korndurchmesser .....	122
Abbildung 6.14: ERGUN-Koeffizienten aus Versuchsergebnissen und Literaturwerten für geometrisch gleichförmige Körper (Kugeln).....	124
Abbildung 6.15: Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion mit geschätzter Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten für Glaskugeln aus eigener Untersuchung, ergänzt mit Literaturwerten .....	124
Abbildung 6.16: ERGUN-Koeffizienten aus Versuchsergebnissen und Literaturwerten für geometrisch ungleichförmige Körper (Sand, Kies).....	125
Abbildung 6.17: Experimentell ermittelte Filterrohrdurchlässigkeiten $k_{FR}$ aus eigener Untersuchung und nach SINGH & SHAKYA (1989), KLOTZ (1969) und GARG & LAL (1971) .....	127
Abbildung 6.18: Definitionsskizze zur Berechnung der Drucklinie für das Gesamtsystem.....	131
Abbildung 6.19: Berechnete Druckhöhen im Aquifermaterial und Filterkies verglichen mit gemessenen Druckhöhen für alle Versuchskonfigurationen.....	132

Abbildung 6.20: Berechneter Drucklinienverlauf als Funktion vom Radius für Beispielversuch .....	133
Abbildung 6.21: Beispielhafte Trennflächen zwischen Aquifermaterial und Filterkies (links) und Filterkies und Filterrohr (rechts) mit unterschiedlichem Maßstab .....	133
Abbildung 6.22: Definitionsskizze zur Berechnung der Druckdifferenzen für die Trennfläche am Bohrloch (links) und die Trennfläche am Filterrohr (rechts) bei einer Durchströmung von links nach rechts.....	135
Abbildung 6.23: Trennflächendruckdifferenz am Bohrloch in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration mit FK 0.7-1.4 mm .....	137
Abbildung 6.24: Trennflächendruckdifferenz am Filterrohr in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration mit FK 0.7-1.4 mm .....	137
Abbildung 6.25: Berechneter Drucklinienverlauf für Versuchskonfiguration mit Kieslochfilter und FK 0.7-1.4 mm mit hohem Unterkorngehalt.....	138
Abbildung 6.26: Ausgebauter Schlitzbrückenfilter ohne Kiesbeklebung nach einer Woche im Versuchsstand.....	139
Abbildung 6.27: Gesamtmodell in Abhängigkeit vom Strömungsregime und vom durchströmten Material .....	142
Abbildung 7.1: Bohr- und Brunnenprofil eines gespannten Entwässerungsbrunnens im Tagebaubereich Garzweiler (Quelle: RWE Power AG) .....	146
Abbildung 7.2: Wahrscheinlichkeiten der Ergebnisse bei 100000 durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen für den Gesamtdruckverlust.....	148
Abbildung 7.3: Prozentuale Anteile der Einzeldruckverluste am Gesamtdruckverlust für verschiedene Bohrlochgeometrien bei einer Entnahmemenge von $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ....	150
Abbildung 7.4: Darstellung der Gesamtdrucklinie für verschiedene Bohrlochgeometrien bei einer Entnahmemenge von $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ .....	150
Abbildung 7.5: Vergleich der Druckverlustanteile für verschiedene Filterkiese bei $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien .....	151
Abbildung 7.6: Vergleich der Druckverlustanteile für verschiedene Filterrohre bei $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien .....	153
Abbildung 7.7: Vergleich der Gesamtdruckverluste für verschiedene Porositäten bei $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien.....	154
Abbildung 7.8: Vergleich der Gesamtdruckverluste für verschiedene Entnahmemengen $Q$ bei vier verschiedenen Bohrlochgeometrien .....	155
Abbildung 7.9: Vergleich der Druckverlustanteile für verschiedene Verhältnisfaktoren der Skinzone bei $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien .....	156
Abbildung 7.10: Ganglinien einer Testbrunnenreihe mit unterschiedlicher Verkiesung im Tagebau Garzweiler .....	159
Abbildung 7.11: Ganglinien einer Testbrunnenreihe mit Glaskugelverkiesung im Vergleich zum Filterkies 0.7-1.4 mm im Tagebau Garzweiler .....	160
Abbildung 7.12: Vergleich der Förderleistungen zwischen Testbrunnen mit Verkiesung 1.4-2.2 mm und benachbarten Vergleichsbrunnen mit Filterkies 0.7-1.4 mm im Tagebau Garzweiler .....	161
Abbildung C.1: Trennflächendruckdifferenz am Bohrloch in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration.....	217

---

Abbildung C.2: Trennflächendruckdifferenz am Filterrohr in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration.....	217
Abbildung D.1: Reynoldszahlen in Abhängigkeit vom Radius für die Variation der Entnahmemenge $Q$ im Anwendungsbeispiel bei vier verschiedenen Bohrlochgeometrien .....	218

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Beispielhafte Reynoldszahlen für die Abgrenzung der Regimebereiche .....	16
Tabelle 2.2:	Auflistung verschiedener kritischer Reynoldszahlen für den Beginn der Abweichung der Strömung vom linear laminaren DARCY-Bereich mit Angabe der Korngrößenbereiche, für welche die Reynoldszahlen ermittelt wurden.....	17
Tabelle 2.3:	Übersicht verschiedener Widerstandsgesetze .....	22
Tabelle 2.4:	ERGUN-Koeffizienten für den laminaren ( $A_E$ und $B_E$ ) und den turbulenten ( $A_T$ und $B_T$ ) Regimebereich in Abhängigkeit vom mittleren Glaskugeldurchmesser nach Untersuchungen von FAND et al. (1987) für einen Reynoldszahlenbereich von 0.18 bis 408.....	25
Tabelle 2.5:	Regimebereiche mit Angabe der kritischen Reynoldszahl und des zu verwendenden Fließgesetzes .....	28
Tabelle 3.1:	Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen für geschlitzte Stahlfilterrohre (Durchmesser 115.4 mm, Rohrlänge 1 m) und verschiedenen freien Filterflächen nach SINGH & SHAKYA (1989).....	41
Tabelle 3.2:	Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen für geschlitzte Stahlfilterrohre mit unterschiedlichen Durchmessern und verschiedenen offenen Filterflächen nach KLOTZ (1969) .....	43
Tabelle 3.3:	Übersicht zu Modellversuchen an vollkommenen Brunnen mit Angabe der Modellart, der untersuchten Parameter und der Erkenntnisse aus der Untersuchung .....	55
Tabelle 3.4:	Vergleich verschiedener Parameter für einen gespannten Grundwasserleiter und einen Grundwasserleiter mit freier Oberfläche .....	60
Tabelle 4.1:	Abmessungen der verwendeten Filterrohre.....	67
Tabelle 4.2:	Übersicht der Druckerbohrungen auf den drei Achsen mit dem jeweiligen Radius .....	69
Tabelle 4.3:	Statistische Auswertung der erzielten Lagerungsdichten für alle Versuchskonfigurationen mit eingebautem Material.....	73
Tabelle 4.4:	Mittelwerte einzelner geotechnischer Parameter der verschiedenen Materialien.....	75
Tabelle 4.5:	Darstellung Randbedingungen im Modellversuch und Verhältnisse im Tagebau.....	77
Tabelle 4.6:	Übersicht der einzelnen Versuchsblöcke mit jeweiliger Fragestellung, verwendeten Filterrohren und Filterkiesen.....	83
Tabelle 4.7:	Versuchskonfigurationen der kiesbeklebten Filterrohre.....	84
Tabelle 4.8:	Versuchskonfigurationen der Filterrohre ohne Kiesbeklebung .....	85
Tabelle 5.1:	Minimale und maximale normierte Durchflüsse und Druckdifferenzen des Brunnenausbaus der vorgestellten Untersuchungen am Brunnenfiltermodell .....	102
Tabelle 6.1:	Minimale und maximale Reynoldszahlen in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien.....	111
Tabelle 6.2:	Maximale und kritische Reynoldszahlen in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien mit Angabe des Regimebereiches und des Fließgesetzes .....	111
Tabelle 6.3:	Parameter der geschätzten Normalverteilung des linearen ERGUN-Koeffizienten im Aquifermaterial .....	116

Tabelle 6.4:	Parameter der geschätzten Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten für Filterkies.....	119
Tabelle 6.5:	Berechnete Filterrohrdurchlässigkeiten durch Minimierung der Fehlerquadratsumme .....	120
Tabelle 6.6:	Zusammenstellung der Datengrundlage für Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13.....	121
Tabelle 6.7:	Parameter der geschätzten Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten für Glaskugeln .....	125
Tabelle 6.8:	Parameter der geschätzten Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten.....	126
Tabelle 6.9:	Mittlere Durchlässigkeiten mit Standardabweichung für Filterrohrklassen.....	129
Tabelle 6.10:	Eingangswerte zur Berechnung des Filterkriteriums nach TERZAGHI & PECK (1961) für die einzelnen Filterkiese mit Angabe der Verhältniswerte $D_{15}/d_{15}$ und $D_{15}/d_{85}$ (grau hinterlegt sind die Werte, bei denen das Filterkriterium nicht eingehalten wird) .....	135
Tabelle 7.1:	Zusammenstellung der Brunnenparameter .....	145
Tabelle 7.2:	Auflistung der ermittelten Reynoldszahlen für die Einzelmaterialien an den begrenzenden Radien für eine Entnahmemenge von $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ .....	147
Tabelle 7.3:	Variationsmatrix zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter auf den Gesamtdruckverlust anhand des Gesamtmodells .....	149
Tabelle 7.4:	Brunnenausbauradien für verschiedene Geometrien mit Angabe der Verkiesungsdicke .....	152
Tabelle 7.5:	Filterrohrgeometrie für verschiedene Bohrlochdurchmesser (alle Angaben in mm) ....	153
Tabelle 7.6:	Randbedingungen Anwendungsbeispiel gegenüber Verhältnissen im Tagebau.....	162
Tabelle A.1:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 1 .....	180
Tabelle A.2:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 2 .....	181
Tabelle A.3:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 3 .....	181
Tabelle A.4:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 4 .....	182
Tabelle A.5:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 5 .....	182
Tabelle A.6:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 6 .....	183
Tabelle A.7:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 7 .....	183
Tabelle A.8:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 8 .....	184
Tabelle A.9:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 9 .....	184
Tabelle A.10:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 10 .....	185
Tabelle A.11:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 11 .....	185
Tabelle A.12:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 12 .....	186
Tabelle A.13:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 13 .....	186
Tabelle A.14:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 14 .....	187
Tabelle A.15:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 15 .....	187
Tabelle A.16:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 16 .....	188
Tabelle A.17:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 17 .....	188
Tabelle A.18:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 18 .....	189
Tabelle A.19:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 19 .....	189

---

Tabelle A.20:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 20 .....	190
Tabelle A.21:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 21 .....	191
Tabelle A.22:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 22 .....	191
Tabelle A.23:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 23 .....	192
Tabelle A.24:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 24 .....	193
Tabelle A.25:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 25 .....	194
Tabelle A.26:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 26 .....	194
Tabelle A.27:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 27 .....	195
Tabelle A.28:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 28 .....	195
Tabelle A.29:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 29 .....	196
Tabelle A.30:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 30 .....	196
Tabelle A.31:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 31 .....	197
Tabelle A.32:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 32 .....	197
Tabelle A.33:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 33 .....	198
Tabelle A.34:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 34 .....	198
Tabelle A.35:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 35 .....	199
Tabelle A.36:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 36 .....	199
Tabelle A.37:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 37 .....	200
Tabelle A.38:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 38 .....	200
Tabelle A.39:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 39 .....	201
Tabelle A.40:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 40 .....	201
Tabelle A.41:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 41 .....	202
Tabelle A.42:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 42 .....	202
Tabelle A.43:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 43 .....	203
Tabelle A.44:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 44 .....	203
Tabelle A.45:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 45 .....	204
Tabelle A.46:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 46 .....	204
Tabelle A.47:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 47 .....	205
Tabelle A.48:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 48 .....	205
Tabelle A.49:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 49 .....	206
Tabelle A.50:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 50 .....	206
Tabelle A.51:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 51 .....	207
Tabelle A.52:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 52 .....	207
Tabelle A.53:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 53 .....	208
Tabelle A.54:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 54 .....	208
Tabelle A.55:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 55 .....	209
Tabelle A.56:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 56 .....	209
Tabelle A.57:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 57 .....	210
Tabelle A.58:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 58 .....	210
Tabelle A.59:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 59 .....	211

---

Tabelle A.60:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 60 .....	211
Tabelle A.61:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 61 .....	212
Tabelle A.62:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 62 .....	212
Tabelle A.63:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 63 .....	213
Tabelle A.64:	Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 64 .....	213
Tabelle B.1:	Berechnete ERGUN-Koeffizienten mit Standardabweichung und Bestimmtheitsmaß für das Aquifermaterial durch Minimierung der Quadratsumme für alle Versuchskonfigurationen.....	214
Tabelle B.2:	Berechnete ERGUN-Koeffizienten des Schüttmaterials durch Minimierung der Fehlerquadratsumme für die einzelnen Versuchskonfigurationen mit mindestens zwei Druckmesspunkten im Schüttmaterial .....	216

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Zeichen

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Dimension</i>
$A$	Fläche	$L^2$
$A_E$	Linearer ERGUN-Koeffizient	-
$A_T$	Linearer ERGUN-Koeffizient für Turbulenz	-
$A_p$	Prozentuale freie Filterrohrdurchtrittsfläche	-
$a_F$	Linearer FORCHHEIMER-Koeffizient	$TL^{-1}$
$a_T$	Linearer FORCHHEIMER-Koeffizient für Turbulenz	$TL^{-1}$
$a_{form}$	Kornformfaktor nach LUDEWIG (1967)	$L^{1,1}T^{-1,1}$
$B_E$	Nichtlinearer ERGUN-Koeffizient	-
$B_T$	Nichtlinearer ERGUN-Koeffizient für Turbulenz	-
$b_F$	Nichtlinearer FORCHHEIMER-Koeffizient	$T^2L^{-2}$
$b_{FR}$	Filterrohrwandstärke	$L$
$B_j$	Linearer Widerstandskoeffizient	$TL^2$
$b_T$	Nichtlinearer FORCHHEIMER-Koeffizient für Turbulenz	$T^2L^{-2}$
$C$	Integrationskonstante	-
$C_j$	Nichtlinearer Brunneneintrittsverlust	$T^2L^{-5}$
$C_c$	Einschnürungskoeffizient Filterrohröffnungen	-
$C_{PM}$	Empirischer Koeffizient	-
$C_p$	Filterrohrparameter	-
$c$	Geometrischer Faktor	-
$c_{GH}$	Geometrischer Faktor nach LUDEWIG (1967)	-
$c_T$	Tracerkonzentration	$ML^{-3}$
$c_W$	Kornfaktor nach WILLIAMS (1985)	-
$c_o$	KOZENY-CARMAN-Konstante	-
$c_{T0}$	Tracerkonzentration zum Zeitpunkt $t = 0$	$ML^{-3}$
$c_v$	Geschwindigkeitskoeffizient	-
$D_{FR}$	Filterrohrdurchmesser	$L$
$D_f$	Durchmesser Versuchsgefäß	$L$
$D_{15}$	Schüttkorndurchmesser bei 15 % Siebdurchgang	$L$
$d$	Korndurchmesser	$L$
$d_{char}$	Charakteristischer Korndurchmesser	$L$
$d_{g,AM}$	Maßgebender Korndurchmesser Aquifermaterial	$L$
$d_k$	Kugeldurchmesser	$L$

$d_{kap}$	Kapillardurchmesser	L
$d_{kw}$	Wirksamer Kugeldurchmesser	L
$d_o$	Korndurchmesser an der oberen Grenze einer Kornklasse	L
$d_s$	Skinzonendicke	L
$d_u$	Korndurchmesser an der unteren Grenze einer Kornklasse	L
$d_w$	Wirksamer Korndurchmesser	L
$d_{10}$	Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang	L
$d_{15}$	Korndurchmesser bei 15 % Siebdurchgang	L
$d_{50}$	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang	L
$d_{60}$	Korndurchmesser bei 60 % Siebdurchgang	L
$d_{85}$	Korndurchmesser bei 85 % Siebdurchgang	L
$F_g$	Filterfaktor	-
$G$	Gewichtsanteil in Prozent	-
$g$	Erdbeschleunigung	LT <sup>-2</sup>
$H$	Ungestörter Grundwasserstand	L
$h$	Druckhöhe	L
$h_{AM}$	Druckhöhe im Aquifermaterial	L
$h_{BL}$	Druckhöhe am Bohrloch	L
$h_{Br}$	Druckhöhe im Brunnen	L
$h_{FK}$	Druckhöhe im Filterkies	L
$h_{FR}$	Druckhöhe am Filterrohr	L
$h_{SM}$	Druckhöhe im Schüttmaterial	L
$h_{Skin}$	Druckhöhe in der Skinzone	L
$h_{ber}$	Berechnete Druckhöhe	L
$h_{gesamt}$	Gesamtdruckhöhe	L
$h_{i,AM}$	Druckhöhe im Aquifermaterial, $i > j$	L
$h_{j,AM}$	Druckhöhe im Aquifermaterial, $i > j$	L
$h_{i,FK}$	Druckhöhe im Filterkies, $i > j$	L
$h_{j,FK}$	Druckhöhe im Filterkies, $i > j$	L
$h_{GW}$	Grundwasserstand	L
$h_p$	Piezometerdruckhöhe	L
$h_w$	Wehrüberfallhöhe	L
$i$	Hydraulischer Gradient	-
$i_{krit}$	Kritischer Gradient	-
$K$	Spezifische Permeabilität	L <sup>2</sup>
$k_{AM}$	Hydraulische Aquifermaterialdurchlässigkeit	LT <sup>-1</sup>
$k_{FR}$	Hydraulische Filterrohrdurchlässigkeit	LT <sup>-1</sup>
$k_f$	Hydraulische Durchlässigkeit	LT <sup>-1</sup>
$k_{f,SM}$	Hydraulische Schüttmaterialdurchlässigkeit	LT <sup>-1</sup>
$k_s$	Hydraulische Skinzonendurchlässigkeit	LT <sup>-1</sup>

$k_{\infty}$	Hydraulische Durchlässigkeit des unbeeinflussten Aquifers	LT <sup>-1</sup>
$L_{FK}$	Verkiesungslänge	L
$L_{FR}$	Filterrohrlänge	L
$L_{SM}$	Schüttmaterialmächtigkeit	L
$L_b$	Bahnlänge	L
$L_k$	Kürzeste Länge	L
$l$	Länge	L
$l_{kap}$	Kapillarlänge	L
$m$	Mächtigkeit	L
$n$	Porosität	-
$n_{eff}$	Effektive Porosität	-
$Q$	Durchfluss	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
$Q_{in}$	Zufluss	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
$Q_{out}$	Abfluss	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
$q$	Durchfluss pro Meter	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> L <sup>-1</sup>
$p$	Druck	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
$R$	Radius (ungestörter Grundwasserstand)	L
$Re$	Reynoldszahl	-
$Re_{max}$	Maximale Reynoldszahl	-
$Re_{min}$	Minimale Reynoldszahl	-
$Re_{krit}$	Kritische Reynoldszahl	-
$Re(r_{au\beta en})$	Reynoldszahl am äußeren Radius	-
$Re(r_{innen})$	Reynoldszahl am inneren Radius	-
$R_{hy}$	Hydraulischer Radius	L
$r$	Radius	L
$r_{AM}$	Radius Aquifermaterial	L
$r_{BL}$	Bohrlochradius	L
$r_{Br}$	Brunneninnenradius	L
$r_{Detektor}$	Detektorradius	L
$r_{FR}$	Filterrohräußenradius	L
$r_{i,AM}$	Radius Aquifermaterial, i>j	L
$r_{j,AM}$	Radius Aquifermaterial, i>j	L
$r_{i,FK}$	Radius Filterkies, i>j	L
$r_{j,FK}$	Radius Filterkies, i>j	L
$r_s$	Skinzonenradius	L
$r_{SM}$	Schüttmaterialradius	L
$r_{krit}$	Kritischer Radius	L
$r_w$	Wirksamer Brunnenradius	L
$S$	Benetzte Kornoberfläche	L <sup>2</sup>
$S_F$	Skinfaktor	-

$S_{FH}$	Flächen-Volumen-Formfaktor	-
$S_i$	Sickerstrecke	L
$S_v$	Spezifische Kornoberfläche	$L^2L^{-3}$
$s$	Exponent	-
$s_w$	Absenkung im Brunnen	L
$T$	Tortuosität	-
$t$	Zeit	T
$U$	Ungleichförmigkeit	-
$u$	Parameter, Stärke der Skinzone	-
$V_F$	Feststoffvolumen	$L^3$
$V_{HW}$	Haftwasservolumen	$L^3$
$V_P$	Porenvolumen	$L^3$
$V_{Peff}$	Nutzbares Porenvolumen	$L^3$
$V_{ges}$	Gesamtvolumen	$L^3$
$v_a$	Abstandsgeschwindigkeit	$LT^{-1}$
$v_f$	Spezifischer Durchfluss, Filtergeschwindigkeit	$LT^{-1}$
$v_{f,krit}$	Kritische Filtergeschwindigkeit	$LT^{-1}$
$v_{kap}$	Kapillargeschwindigkeit	$LT^{-1}$
$v_{pm}$	Mittlere Porengeschwindigkeit	$LT^{-1}$
$v_r$	Radiale Fließgeschwindigkeit	$LT^{-1}$
$w$	Exponent, Dicke der Skinzone	-
$x_i$	Messwert	
$z$	Höhe über Bezugsniveau	L

### Indizes und Vereinbarungen

$\Delta$	Differenz
$\partial/\partial x_i$	Partielle Ableitung
$d/dx_i$	Vollständige Ableitung
$i$	Laufindex
$j$	Laufindex
$k$	Anzahl Messwerte

### Griechische Zeichen

$\alpha$	Winkel	°
$\alpha_{skin}$	Skinverhältnisfaktor	-
$\beta$	Nicht-DARCY-Koeffizient	$T^2L^{-2}$
$\varepsilon$	Überfallbeiwert	-
$\lambda$	Parameter für nichtlinearen Term	-

$\gamma$	Feldverzerrungsverhältnis	-
$\sigma$	Standardabweichung	
$\eta_s$	Skinneffektparameter	-
$\rho_s$	Korndichte	ML <sup>-3</sup>
$\rho_w$	Dichte des Wassers	ML <sup>-3</sup>
$\rho_{LD}$	Lagerungsdichte	ML <sup>-3</sup>
$\mu$	Dynamische Viskosität	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>
$\nu$	Kinematische Viskosität	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>
$\nu_{10^\circ\text{C}}$	Kinematische Viskosität bei einer Temperatur von 10 °C	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>
$\theta$	Temperatur	°C
$\xi$	Widerstandsbeiwert	-
$\xi_v$	Verlustbeiwert	-
$\xi_w$	Widerstandsbeiwert nach WITTMANN (1980)	-

### Abkürzungen

<i>AM</i>	Aquifermaterial
<i>BL</i>	Bohrloch
<i>FK</i>	Filterkies
<i>DN</i>	Nominaler Filterrohrdurchmesser
<i>FR</i>	Filterrohr
<i>GK</i>	Glaskugeln
<i>GW</i>	Grundwasser
<i>KLF</i>	Kieslochfilter
<i>KSF</i>	Kiesstabfilter
<i>REV</i>	Repräsentatives Elementarvolumen
<i>SBF</i>	Schlitzbrückenfilter
<i>SF</i>	Scheibenfilter
<i>SM</i>	Schüttmaterial
<i>WDF</i>	Wickeldrahtfilter

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Weltweit wird mit Brunnen der am weitesten verbreitete und meist genutzte Rohstoff Grundwasser gefördert, welcher für die Trinkwasserversorgung, die Bewässerung in der Landwirtschaft und viele industrielle Produktionsprozesse genutzt wird (HÖLTING & COLDEWEY, 2005; STRUCKMEIER et al., 2003). Grundwasser ist wichtig für den globalen Wasserkreislauf, da es Flüsse und Quellen speist, Feuchtgebiete unterstützt und als regenerative Süßwasserressource den Wasserbedarf sichert (UNESCO, 2006).

Die Fassung und Förderung von Grundwasser ist daher eine Hauptaufgabe in der Daseinsvorsorge des Menschen, wobei Brunnen weltweit das zentrale technische Element zur Grundwassergewinnung sind (BALKE et al., 2000). Die unterirdischen Grundwasserressourcen sind auch zukünftig die bedeutendsten nutzbaren Wasserreserven, um dem prognostizierten Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum zu begegnen (HÖLTING & COLDEWEY, 2005; STRUCKMEIER et al., 2003). Vor dem Hintergrund des aktuellen und zukünftig erwarteten Klimawandels werden sich gerade in den Gebieten mit drohender Wasserknappheit die Anforderungen an die Grundwasserförderung verändern. Heute noch ungenutzte Gebiete müssen erschlossen und vorhandene Grundwassernutzungen nachhaltig betrieben werden.

Die Bedeutung von Brunnen ist nicht nur auf die Erfassung des Grundwasserleiters begrenzt. Auch für Umweltsanwendungen wie die Reinigung von Grundwasserkontaminationen oder zur Begrenzung der Versalzung von Küstengebieten werden Brunnen benötigt (HANTUSH, 2003). Außerdem werden zur kurzzeitigen oder langfristigen Absenkung des Grundwasserstandes für die Tagebauentwässerung oder zur Wasserhaltung von temporären Baugruben Brunnen eingesetzt.

Die Berechnung der zuströmenden Wassermenge zum Brunnen basiert auf vereinfachenden Annahmen zum Modellsystem des Brunnens im Grundwasserleiter. Der Brunnen selbst ist ein Fremdkörper im hydraulischen System des Grundwasserleiters und beeinflusst durch die Wasserentnahme das unterirdische Strömungssystem. Durch die Entnahme bildet sich ein trichterförmiger Absenkungsbereich radial um den Brunnen, dessen Ausdehnung und Tiefe von der Entnahmemenge und den Eigenschaften des durchströmten Grundwasserleiters abhängen. Die wesentlichen Vereinfachungen im Modellsystem betreffen die Annahme einer rein horizontalen und laminaren Anströmung aus dem Grundwasserleiter zum Brunnen sowie die Annahme eines homogenen und isotropen Grundwasserleiters. Dadurch wird das komple-

xe radialsymmetrische Anströmungssystem analytisch lösbar und die Anströmungsmenge aus dem Grundwasserleiter, welche durch den Brunnen gefasst werden muss, ermittelbar.

Die vereinfachenden Annahmen zur Abschätzung der Anströmungsmenge sind jedoch im Brunnennahbereich meist nicht zutreffend. Durch die stetige Querschnittsverengung muss bei Einhaltung der Kontinuitätsbedingung die Fließgeschwindigkeit zum Brunnen hin zunehmen. Dadurch treten gerade im Brunnennahbereich sehr steile Gradienten bei der Brunnenanströmung auf (EWING et al., 1999; HERTH & ARNDTS, 1985). Aufgrund der zunehmenden Fließgeschwindigkeit kommt es zu erhöhten Reibungsverlusten im Porenraum und die Strömung ist nicht mehr zwangsläufig im linear laminaren Regimebereich (UPADHYAY, 1977).

Zwischen der prognostizierten Leistungsfähigkeit eines geplanten Vertikalfilterbrunnens und der tatsächlich Leistungsfähigkeit, welche durch einen Pumpversuch ermittelt wird (TRESKATIS, 1996), besteht häufig eine Diskrepanz. Ziel der Brunnenbemessung ist es, den Wasserandrang aus dem Grundwasserleiter zu ermitteln und den Brunnen als Wasserfassungsorgan für diese Wassermenge auszulegen, damit das Wasser gezielt gesammelt und an die Erdoberfläche befördert werden kann. Dabei wird die anströmende Menge von der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters beeinflusst, während die zu fassende Menge von der Geometrie und den Abmessungen des Filterrohrs und des Bohrlochs abhängt. Die Wirkung des Filterrohrs und auch eines umgebenden Rings aus Schüttmaterial wurde in der Vergangenheit durch zahlreiche experimentelle Untersuchungen analysiert, um die Leistungsfähigkeit des Brunnenbauwerks besser auf den jeweiligen Grundwasserleiter anpassen zu können.

Hydraulische Diskontinuität tritt an den Kontaktflächen zwischen dem Grundwasserleiter und dem Brunnenausbau auf. Diese Kontaktflächen mit ihrem Wechsel in der Durchlässigkeit stellen bei der Anströmung des Wassers aus dem Grundwasserleiter im Brunnennahbereich somit eine Besonderheit dar. Daher ist es wichtig, die Strömungsprozesse im Brunnennahbereich detailliert zu untersuchen, um alle Prozesse zu berücksichtigen.

Meist wird im Brunnen eine größere Absenkung des Wasserstands gemessen, als die theoretischen Berechnungen ergeben (TRESKATIS et al., 1998). Diese Diskrepanz wird durch die Einführung von Brunneneintrittsverlusten, welche empirisch ermittelt werden, ausgeglichen. Wenn der Absenkungstrichter des Brunnens unter Berücksichtigung aller durchströmten Materialien analytisch beschrieben werden könnte, so wäre der Einfluss einzelner Prozesse auf den Druckverlust direkt quantifizierbar und muss nicht über empirische Verlustbeiwerte abgeschätzt werden.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Aufgabe dieser Arbeit ist es daher, die Brunnenanströmung im direkten Nahbereich in Abhängigkeit des Strömungsregimes sowie der Aquifer-, Schüttmaterial- und Filterrohreigenschaften im physikalischen Experiment zu untersuchen. Als Ergebnis wird die vorhandene Theorie erweitert und daraus Empfehlungen für die Praxis abgeleitet. Gerade für die Planung eines Brunnenbauwerks ist es von großer Bedeutung, die Materialien optimal auf den umgebenden Aquifer abzustimmen, um möglichst geringe Verluste und eine maximale Förderleistung zu erhalten.

In der Vergangenheit wurden bereits Untersuchungen an Brunnenausschnittsmodellen (begrenzte Mächtigkeit eines Kreissegmentstückes) durchgeführt, um die hydraulischen Bemessungsgrundlagen für Vertikalfilterbrunnen zu verbessern. Das sich ändernde Strömungsregime sowie eine Beeinflussung der Strömung durch Wandeffekte bei Kreissegmentstücken wurden bei den bisherigen Modellversuchen nicht berücksichtigt. Es fehlen auch systematische Brunnenmodellversuche mit einer Vielzahl von Filterrohrtypen bei unterschiedlichen Schüttmaterialien und verschiedenen vorgelagerten Aquifermaterialien. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neue Versuchsanlage entwickelt und eingesetzt, welche durch eine zylindrische Form die vollständige radiale Anströmung ohne Wandinflüsse sicherstellt. Mit dieser Anlage werden umfangreiche Versuche zur Untersuchung des Brunnenausbauwiderstands verschiedener Filterrohre und Ringraummaterialien im Rahmen einer Forschungsoperation mit der RWE Power AG durchgeführt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, auf der Basis experimenteller Untersuchungen ein theoretisches Modell für das Gesamtsystem des Brunnens bestehend aus dem direkt umgebenden Aquifermaterial und dem Brunnenausbau mit Schüttmaterial und Filterrohr zu entwickeln. Dieses Modell soll die stationäre Brunnenanströmung unter Berücksichtigung der radialen Anströmung, des Strömungsregimes, des Filterrohrtyps und des porösen Schüttmaterials für verschiedene Aquifermaterialien unter Berücksichtigung der auftretenden Verluste an den Kontaktflächen Filterrohr/Schüttmaterial, Schüttmaterial/Aquifermaterial beschreiben.

Dazu werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung der Strömung im porösen Medium dargestellt. Es werden die Eigenschaften des porösen Mediums und der Strömung analysiert und die einzelnen Ansätze zur Strömungsbeschreibung in wechselnden Regimebereichen aufgeführt und bewertet. Diese Ansätze werden im Kapitel 3 auf die Brunnenanströmung übertragen, wobei ein besonderes Augenmerk auf der Berücksichtigung einzelner Verlustkomponenten liegt. Zudem werden in diesem Kapitel in der Vergangenheit durchgeführte experimentelle Versuche mit Brunnenmodellen ausführlich behandelt und diskutiert.

In Kapitel 4 werden das Modellkonzept und die Messtechnik des eigenen physikalischen Versuchsstands erläutert sowie die versuchsbegleitenden geotechnischen Untersuchungen und die verwendeten Materialien für den Brunnenausbau mit umgebendem Aquifermaterial dargestellt. Die Diskussion der Modelleffekte und die Darlegung des durchgeführten Untersuchungsprogramms schließen dieses Kapitel ab.

Die phänomenologische Beschreibung der Ergebnisse der Strömungsprozesse bei der Untersuchung des Brunnenausbaus in Kapitel 5 führen zur Übertragung der theoretischen Ansätze der Durchströmung poröser Medien auf die Strömung im Brunnennahbereich unter Berücksichtigung aller Verlustkomponenten in Kapitel 6. Ausgehend von dem jeweiligen Regimebereich werden in diesem Kapitel die benötigten Koeffizienten der Einzelmaterialien für die analytische Beschreibung der Druckhöhenabnahme im Brunnennahbereich abgeleitet. Damit wird die Gesamtdrucklinie geschlossen beschreibbar und die Prozesse und Effekte an den Trennflächen können analysiert werden. Abschließend wird ein Gesamtmodell zur Beschreibung der Strömung im Brunnennahbereich aufgestellt, welches alle Verlustkomponenten berücksichtigt.

Dieses Gesamtmodell wird in Kapitel 7 auf einen Beispielbrunnen aus der Tagebautwässerung angewendet und der Einfluss verschiedener Parameter auf den Einzel- und Gesamtdruckverlust bei der Brunnenanströmung untersucht. Abschließend werden in Kapitel 8 die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und der sich daraus ergebende zukünftige Forschungsauftrag formuliert.

### 1.3 Begriffsdefinitionen

Der Bereich des Gesteinskörpers, in welchem Grundwasser strömt, wird als Grundwasserleiter bezeichnet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird durchgängig der Begriff Aquifer als Synonym für den Begriff Grundwasserleiter verwendet, wobei nur Porengrundwasserleiter betrachtet werden, welche aus porösen Sanden oder Kiesen bestehen.

Abbildung 1.1 zeigt einen Querschnitt durch einen gespannten Grundwasserleiter mit einem vollkommenen Vertikalfilterbrunnen. Der Grundwasserleiter wird oben und unten von einer undurchlässigen Schicht begrenzt, so dass die Grundwasseroberfläche nicht mit der Grundwasserdruckfläche identisch ist. Durchteuft der Brunnen den gesamten Grundwasserleiter bis zur unteren undurchlässigen Schicht, wird dieser Brunnen als vollkommen bezeichnet. Ein unvollkommener Brunnen endet innerhalb des Grundwasserleiters.

Beim Bau eines Brunnens wird das Bohrloch im Grundwasserleiter mit einem Filterrohr versehen und der verbleibende Ringraum mit Schüttmaterial verfüllt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Filterkies synonym zu Schüttmaterial verwendet. Aus dem Innenraum des

Brunnens wird mit einer Pumpe das Grundwasser entnommen, so dass sich im stationären Zustand als Folge der Grundwasserentnahme die Grundwasserdruckfläche zum Brunnen hin abnimmt und sich ein Absenkungstrichter einstellt.

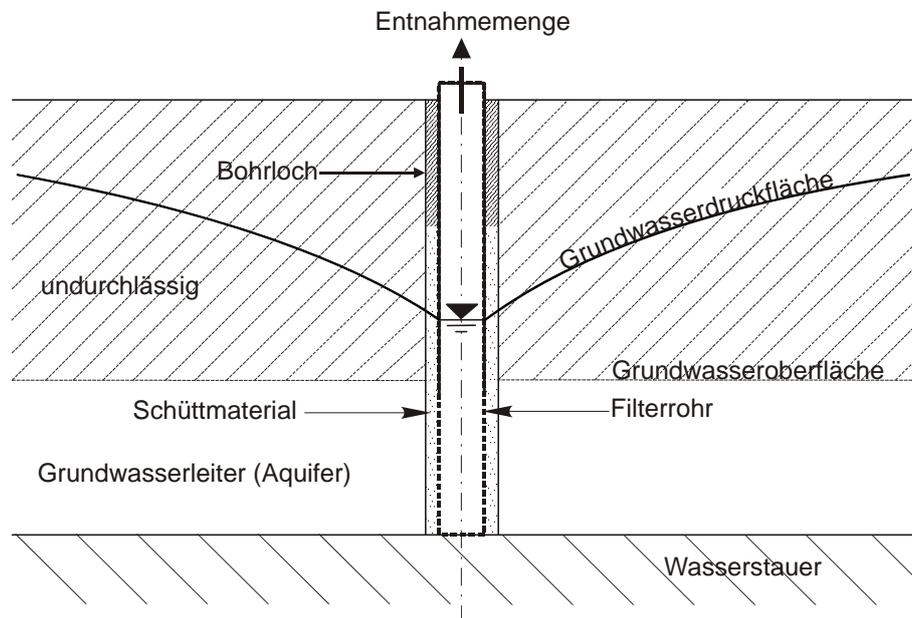


Abbildung 1.1: Vertikalfilterbrunnen im gespannten Grundwasserleiter

Mit dem Begriff der gesättigten Zone wird der Teil des Aquifers bezeichnet, der zum Betrachtungszeitpunkt vollständig mit dem Fluid Wasser gefüllt ist. Dies umfasst nach DIN 4049-3 (1994) sowohl den gesamten Grundwasserraum als auch den geschlossenen Kapillarraum. Im Gegensatz zur gesättigten Zone bezeichnet die ungesättigte Zone den Gesteinskörper, welcher zum Betrachtungszeitpunkt nicht vollständig mit Grundwasser gefüllt ist. Diese ungesättigte Zone stellt den Sickerraum ohne den geschlossenen Kapillarraum dar. Eine Unterscheidung der beiden Zonen wird in Abbildung 1.2 mit den aufgeführten Begriffen dargestellt.

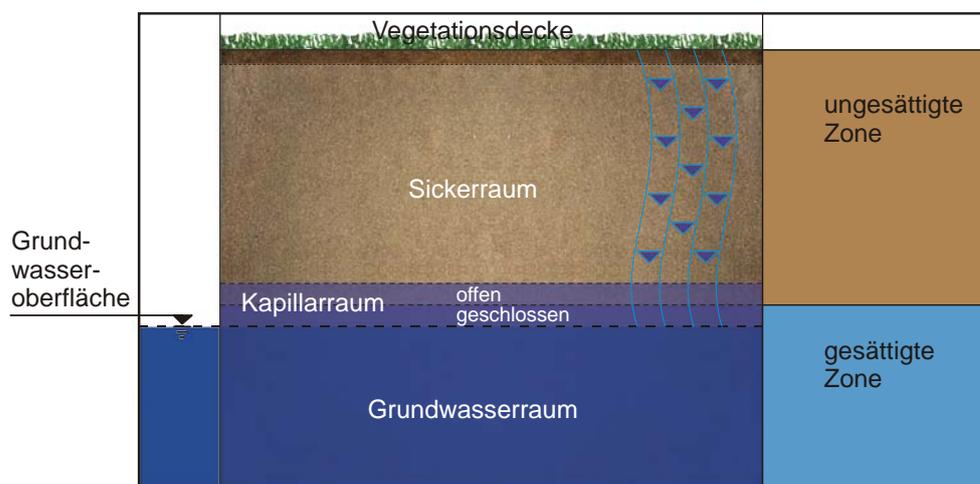


Abbildung 1.2: Gesättigte und ungesättigte Zone nach DIN 4049-3 (1994)

## 2 Grundlagen der Strömung im porösen Medium

### 2.1 Vorbemerkungen

Für die Betrachtung der Strömung im gesättigten porösen Medium sind zunächst die Eigenschaften der beiden beteiligten Komponenten poröses Medium und Fluid zu untersuchen. Zur mathematischen Beschreibung der Strömung werden aufgrund des komplexen Systems eines porösen Mediums vereinfachte Modellvorstellungen benötigt. Da bei der Strömung im porösen Medium in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit unterschiedliche Kräfte auf die poröse Matrix wirken, werden die Modellansätze für verschiedene Regimebereiche dargestellt.

Die Bewegung des Wassers im Porenraum des Grundwasserleiters ist eine gravitationsbedingte Strömung von einem höheren Potenzial zum jeweils niedrigeren Potenzial. Die Strömung verläuft vom Punkt mit der höheren Piezometerdruckhöhe zum Punkt mit der niedrigeren Piezometerdruckhöhe, wobei die Piezometerdruckhöhe  $h_p$  wie folgt definiert ist

$$h_p = \frac{p}{\rho_w \cdot g} + z \quad (2.1)$$

mit dem Druck  $p$  und der Höhe  $z$  über dem Bezugsniveau sowie der Dichte  $\rho_w$  des Wassers und der Erdbeschleunigung  $g$ . Der hydraulische Gradient  $i$  als Druckverlust  $\Delta h$  zu durchströmter Länge  $\Delta l$  ist die treibende Kraft, welche das Fluid zum Punkt niedrigerer Energie strömen lässt.

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.2)$$

Die Strömungsprozesse im Aquifer werden einerseits von den physikalischen Fluideigenschaften des Strömungsmediums Wasser und andererseits von den Eigenschaften der durchströmten porösen Matrix beeinflusst. Die im unbeeinflussten Grundwasserleiter auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten sind sehr langsam. Diese Strömung wird nur durch die inneren Reibungskräfte des Fluids beeinflusst, während Trägheitskräfte in der Regel vernachlässigbar sind (DYBBS & EDWARDS, 1984).

Für die Ableitung von Gesetzmäßigkeiten der Bewegung im Porenraum werden in Kapitel 2.2 zunächst die Eigenschaften des porösen Mediums und des Strömungsmediums und danach die möglichen Betrachtungsmaßstäbe für die Strömung in porösen Medien dargestellt.

## 2.2 Bewegung im Porenraum

### 2.2.1 Eigenschaften des porösen Mediums

Die Hohlräume eines porösen Mediums bilden ein räumliches Netzwerk von miteinander verbundenen Röhren, welche eine variierende Länge, Querschnitt und Orientierung aufweisen und welche sich an Knotenpunkten treffen (BEAR, 1972). Das dadurch gebildete Porenvolumen ist abhängig von der Lagerungsdichte des Lockergesteins. Je dichter die Lagerung der einzelnen Körner ist und je weniger die einzelnen Körner nach ihrer Größe sortiert sind, desto kleiner ist der Porenanteil. Auch die Kornform hat einen Einfluss auf den Porenanteil, denn je unregelmäßiger die Kornoberfläche ist, desto sperriger ist die Lagerung und desto größer ist das Porenvolumen, das die Gesamtheit aller Poren dargestellt. Der Porenanteil oder die Porosität  $n$  ist definiert als der Quotient aus dem Porenvolumen  $V_P$  zum Gesamtvolumen  $V_{ges}$ . Die Differenz aus dem Gesamtvolumen  $V_{ges}$  abzüglich des Feststoffvolumens  $V_F$  ergibt das Porenvolumen  $V_P$ .

$$n = \frac{V_P}{V_{ges}} = \frac{V_{ges} - V_F}{V_{ges}} \quad (2.3)$$

Für die Bewegung des Wassers im Aquifer sind nicht nur die vorhandenen Hohlräume von Bedeutung, sondern auch der Anteil an Hohlräumen, der für die Bewegung zur Verfügung steht. Aufgrund der Eigenschaft der porösen Matrix, Wasser durch Adhäsionskräfte an die Oberfläche der einzelnen Körner zu binden, steht nicht das gesamte Hohlraumvolumen für die Grundwasserströmung zur Verfügung. Auch können Poren mit nur einer Eintrittsöffnung und ohne Austrittsöffnung vorhanden sein, welche dann nicht am Strömungsprozess beteiligt sind (CHHABRA, 2007). Daher wird der Begriff der effektiven Porosität  $n_{eff}$  für das Hohlraumvolumen, welches für die Schwerkraftentwässerung zur Verfügung steht, verwendet. Das nutzbare Porenvolumen  $V_{Peff}$  wird als Differenz aus dem Porenvolumen  $V_P$  abzüglich des Haftwasservolumens  $V_{HW}$  gebildet, so dass sich die effektive Porosität  $n_{eff}$  wie folgt ergibt:

$$n_{eff} = \frac{V_{Peff}}{V_{ges}} = \frac{V_{ges} - V_F - V_{HW}}{V_{ges}} \quad (2.4)$$

Die Poren im Grundwasserleiter stellen ein räumliches Netzwerk dar, welches aus mehr oder weniger stark gekrümmten und in ihrem Querschnitt variierenden Röhren besteht. Hierfür wird nach CARMAN (1937) die Bezeichnung Tortuosität (siehe Abbildung 2.1) eingeführt, welche eine gekrümmte, unregelmäßig verlaufende Bahn zwischen den Körnern der Matrix definiert.

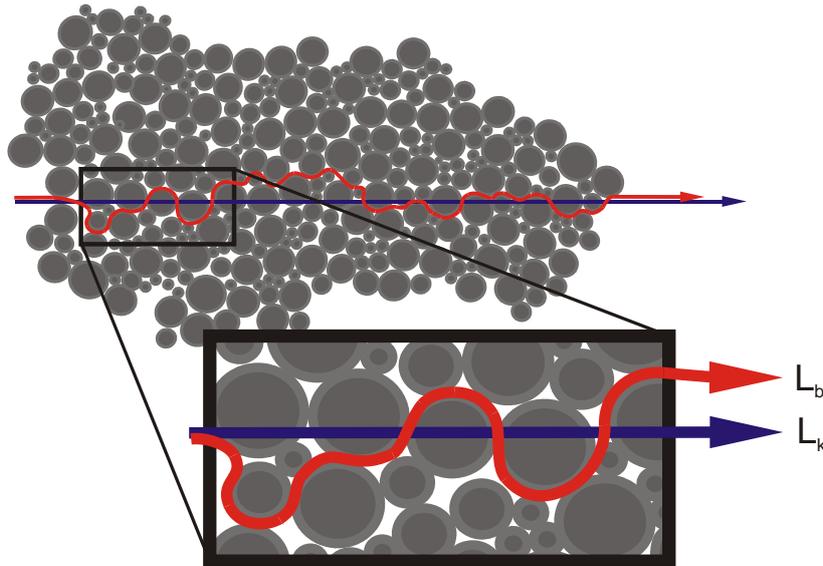


Abbildung 2.1: Tortuose Pfade durch ein poröses Medium mit der kürzesten Länge  $L_k$  und der Bahnlänge  $L_b$ , exemplarisch an einem vergrößerten Kugelmodell dargestellt

Die Tortuosität  $T$  ist ein geometrischer Faktor und kennzeichnet den Grad der Gewundenheit der Transportwege in der porösen Matrix. Sie wird nach BEAR (1972) definiert als Verhältnis zwischen der theoretisch kürzesten Länge  $L_k$  und der tatsächlich durchströmten Bahnlänge  $L_b$  längs der Kornoberfläche.

$$T = \left( \frac{L_b}{L_k} \right) \quad (2.5)$$

Der Quotient  $L_k/L_b$  kann nach WITTMANN (1980) über die Verwendung eines Kugelmodells mit  $2/\pi$  abgeschätzt werden, wobei die kürzeste Länge dem Kugeldurchmesser und die durchströmte Länge dem halben Kugelumfang entspricht. In der Literatur wird nach CHHABRA (2007) auch häufig der Tortuositätsfaktor  $T$  als Quadrat von  $L_k/L_b$  angegeben, wenn die Tortuosität sowohl bei der Fließgeschwindigkeit als auch bei der Fließweglänge als Korrekturfaktor berücksichtigt wird. Eine direkte Messung der Tortuosität ist nicht möglich, sie kann jedoch nach LIU & MASLIYAH (1996) zum Beispiel durch ein elektrisches Analogiemodell im linear laminaren Regime aus der Porosität abgeschätzt werden mit

$$T = \sqrt{n}. \quad (2.6)$$

Weitere Möglichkeiten zur Ermittlung der Tortuosität sind bei SCHEIDEGGER (1974) beschrieben.

Der Gesteinskörper des Aquifers besteht aus einzelnen Körnern unterschiedlicher Größe, welche mit einer variierenden Lagerungsdichte in einer Matrix angeordnet sind, so dass sich ein System aus weitverzweigten Poren unterschiedlicher Größe ausbildet. Die Anordnung der

Körner resultiert aus der Entstehungsgeschichte des Aquifermaterials und ist stochastisch geprägt. Die Größenzusammensetzung eines Korngemisches wird zum Beispiel anhand einer Korngrößenbestimmung ermittelt. Hierzu wird das Korngemisch in Siebsätzen mit unterschiedlichen Maschenweiten geschüttelt und anschließend werden die Siebrückstände fraktionsweise ausgewogen. Die Darstellung der so ermittelten Werte erfolgt in einer Summenkurve, welche beispielhaft für ein Korngemisch in Abbildung 2.2 dargestellt ist.

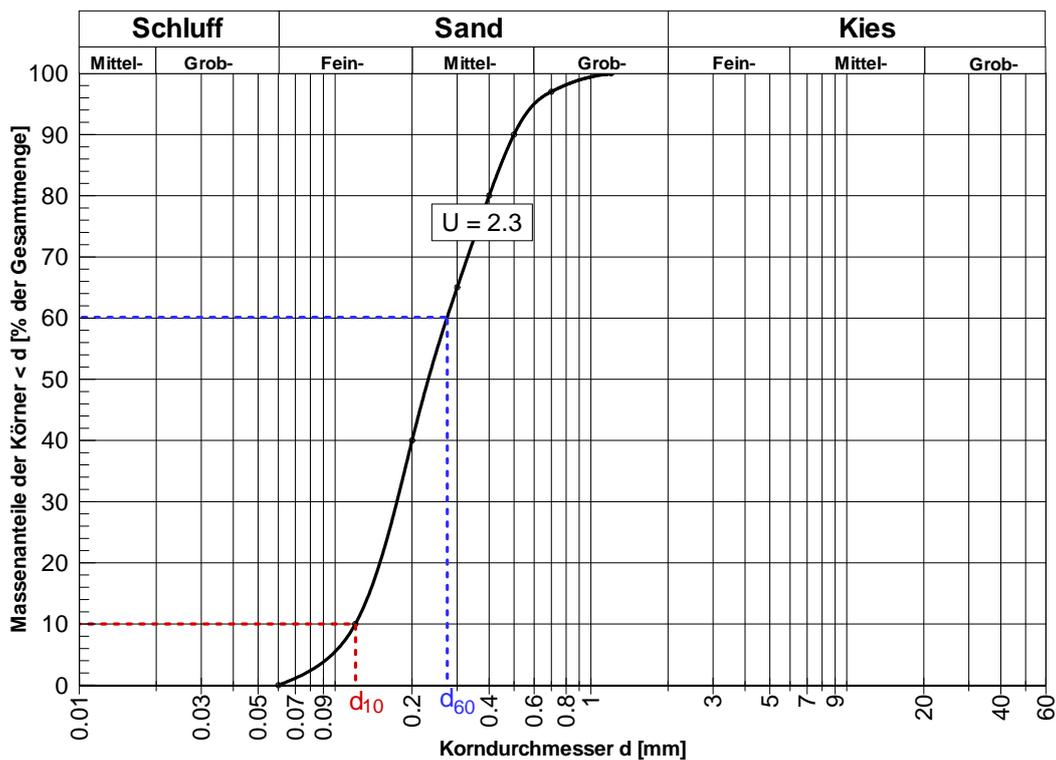


Abbildung 2.2: Beispielkornverteilungen eines Aquifermaterials mit Angabe der Ungleichförmigkeit  $U$

Die Korngröße mit einem Massenanteil von 50 % an der Gesamtmenge wird als mittlerer Korndurchmesser  $d_{50}$  und der Quotient aus den Korndurchmessern bei 60 % ( $d_{60}$ ) und 10 % ( $d_{10}$ ) wird als Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  bezeichnet.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.7)$$

Die Ungleichförmigkeit eines Korngemisches hat auch Einfluss auf die Lagerungsdichte, da bei höheren Ungleichförmigkeitsgraden feinere Körner die Lücken zwischen den größeren Körnern gut ausfüllen können.

Bei den durch Siebung ermittelten Korndurchmessern ist zu bedenken, dass es sich um Äquivalentdurchmesser handelt, welche die Kornform nicht berücksichtigen. Es wird angenommen, dass die Körner eine Kugelform aufweisen und daher von Sieben mit

quadratischen Maschen in Einzelfractionen aufgeteilt werden können. Die Zurückhaltung unregelmäßiger Körner durch ein zweidimensionales Sieb beinhaltet somit eine methodische Unschärfe, ist jedoch das einfachste Verfahren zur Korngrößenbestimmung. Ein Beispiel zur Verdeutlichung der unregelmäßigen Kornform eines Sands als typisches poröses Medium zeigt die Abbildung 2.3.

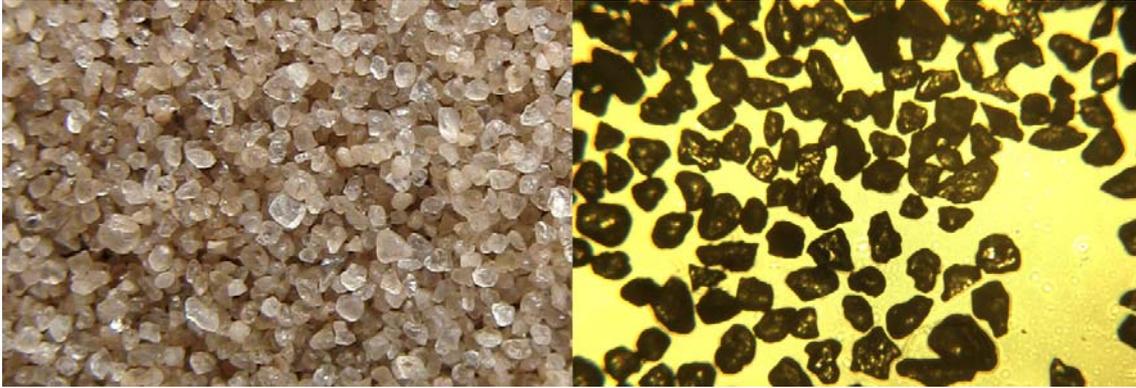


Abbildung 2.3: Beispiel eines porösen Mediums (links) mit mikroskopischer Darstellung der unregelmäßigen Kornform (rechts)

Die Eigenschaften des porösen Mediums werden von der räumlichen Anordnung und der Größe und Form der Körner bestimmt, welche ein komplexes räumliches Haufwerk unterschiedlich geformter Körner verschiedener Größe bilden. Das Hohlraum- oder Porenraumvolumen, welches durch die Anordnung der Körner in einer Matrix mit variierender Lagerungsdichte entsteht, wird durch Porenraummodelle (siehe Abbildung 2.4) abstrahiert. Nach HAYES et al. (1995) können die verschiedenen Porenraummodelle grob in folgende vier Klassen eingeteilt werden:

- empirische Modelle, welche auf Dimensionsanalysen basieren
- geometrische Modelle, welche die Mikrostruktur des Hohlraumvolumens als Röhre abbilden (Kapillarmodelle)
- geometrische Modelle, welche die Porenberandung als Strömungshindernis betrachten und von dem Strömungswiderstand des umströmten Einzelements auf den Gesamtwiderstand schließen
- statistische Modelle, welche die Verzweigungsmöglichkeiten des Porenpfades im dreidimensionalen Porenraum mit Hilfe der Perkolationstheorie berücksichtigen

Von vielen Autoren wird das Kapillarmodell bevorzugt, welches die Hohlräume der porösen Matrix in erster Näherung als Bündel paralleler oder gewundener Porenkapillaren auffasst (siehe zum Beispiel BLAKE, 1922; KOZENY, 1927; CARMAN, 1937; BEAR, 1972; TRUSSELL & CHANG, 1999; CHAPUIS & AUBERTIN, 2003).

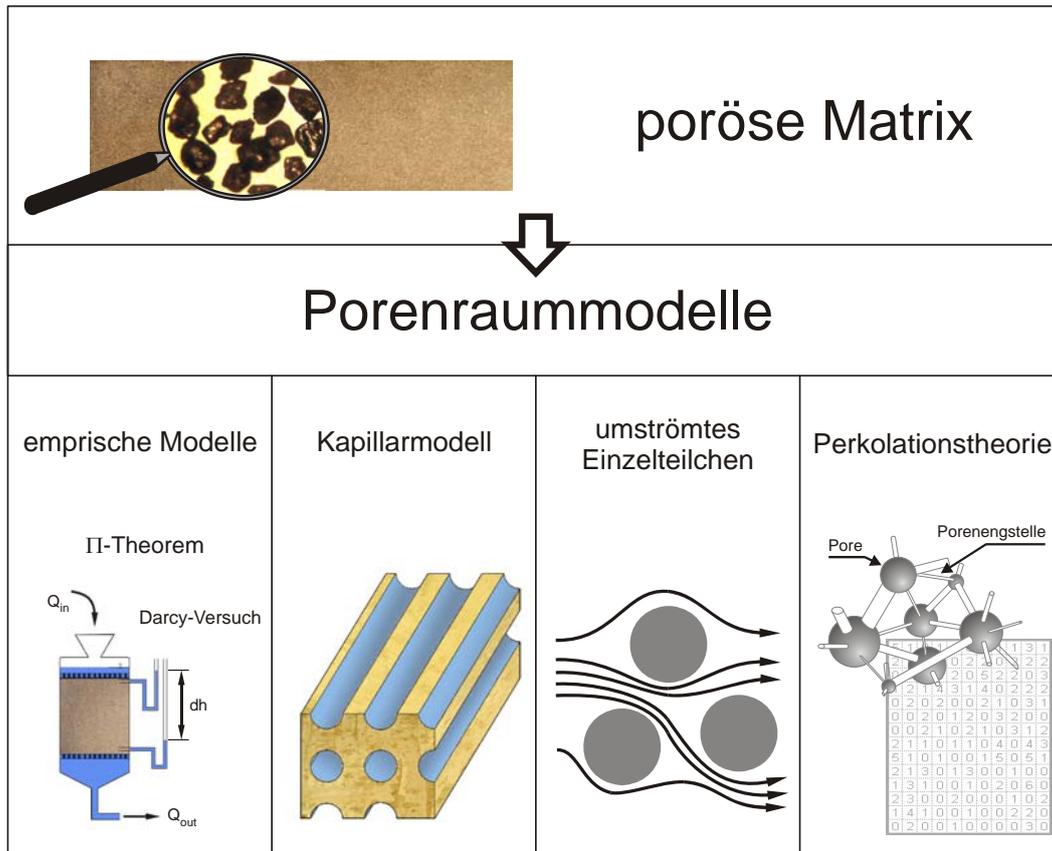


Abbildung 2.4: Darstellung der verschiedenen Porenraummodelle zur Abbildung der porösen Matrix

Die Durchlässigkeit des porösen Mediums für ein Fluid wird als Permeabilität bezeichnet und ist abhängig von dem Porenvolumen, der Packungsstruktur, der Lagerungsdichte und der Kornform. Die spezifische Permeabilität  $K$  ist eine gesteinskennzeichnende Konstante und daher unabhängig von den Fluideigenschaften. Sie hat die Dimension einer Fläche  $[L^2]$  und kann allgemein durch folgenden Ansatz in Abhängigkeit eines charakteristischen Korndurchmessers  $d_{char}$  dargestellt werden mit

$$K = C_{PM} \cdot d_{char}^2, \tag{2.8}$$

wobei der empirische Koeffizient  $C_{PM}$  die Tortuosität, Kornform, Anordnung der Körner und Porosität berücksichtigt (SHEPHERD, 1989).

Für praktische Grundwasserfragestellungen interessiert in den meisten Fällen die Strömung auf der Makroebene und nicht die Durchströmung einer einzelnen Pore auf der Mikroebene. Wird ein geeignetes repräsentatives Elementarvolumen (REV) verwendet, dessen Abmessungen im Vergleich zu den charakteristischen Abmessungen der heterogenen porösen Matrix genügend groß ist (vgl. Abbildung 2.5), so können örtlich statistische Mittelwerte zur Beschreibung der Eigenschaften und Zustandsvariablen der porösen Matrix verwendet werden. Das REV muss jedoch auch klein genug gewählt werden, um die örtlich statistischen Mittel-

werte noch als differential kleine Feldgrößen betrachten zu können und damit partielle Differentialgleichungen zur Beschreibung der Strömungsprozesse aufstellen zu können (BUSCH et al., 1993). Diese Betrachtungsweise ist die Grundlage für das Kontinuumsmodell, da die Makrostruktur des Grundwasserleiters als Kontinuum aufgefasst wird.

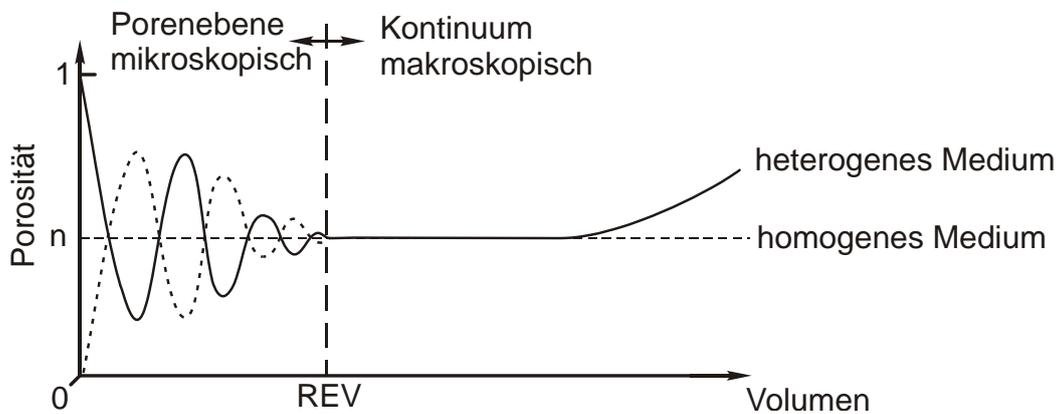


Abbildung 2.5: Mikroskopischer und makroskopischer Betrachtungsmaßstab mit Definition des repräsentativen Elementarvolumens (REV), verändert nach BEAR (1972)

### 2.2.2 Eigenschaften der Strömung

Das Strömungsfluid Wasser hat im Vergleich zu anderen Fluiden ein relativ hohes Dipolmoment und bedingt dadurch eine gute Löslichkeit für viele Stoffe. Der Dipolcharakter ist verantwortlich für die temperaturabhängigen physikalischen Eigenschaften des Wassers (BALKE et al., 2000). Zum Beispiel ist die größte Dichte  $\rho_w$  bei einer Temperatur von 3.98 °C erreicht und nimmt mit zunehmender Erwärmung ab. Von Bedeutung für die Bewegung des Grundwassers ist die Viskosität oder innere Reibung, welche auf der intermolekularen Anziehung beruht. Die dynamische Viskosität  $\mu$  und die kinematische Viskosität  $\nu$  nehmen mit steigender Temperatur ab, wobei  $\nu = \mu / \rho_w$  ist. Einen Überblick über die Temperaturabhängigkeit zweier ausgewählter physikalischer Eigenschaften des Wassers (Dichte und kinematische Viskosität) gibt Abbildung 2.6.

Die kinematische Viskosität von Wasser beeinflusst in hohem Maß die Strömungsprozesse in porösen Medien. Aufgrund der inneren Reibung bewegt sich das Wasser in dem engen Porensystem bei geringen Geschwindigkeiten wirbelfrei auf parallelen Bahnen. Im Gegensatz zu dieser laminaren Strömung kann es auch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie zum Beispiel im direkten Brunnennahbereich auftreten (MATHIAS et al., 2008), zu einer Verwirbelung der Strombahnen und damit zu einer turbulenten Strömung kommen. Mit einem wachsenden Einfluss der Trägheitskräfte auf die Bewegung bei zunehmender Fließgeschwindigkeit wird die Parallelität der Strombahnen aufgeweicht und es kommt zu einer Durchmischung der einzelnen Strombahnen.

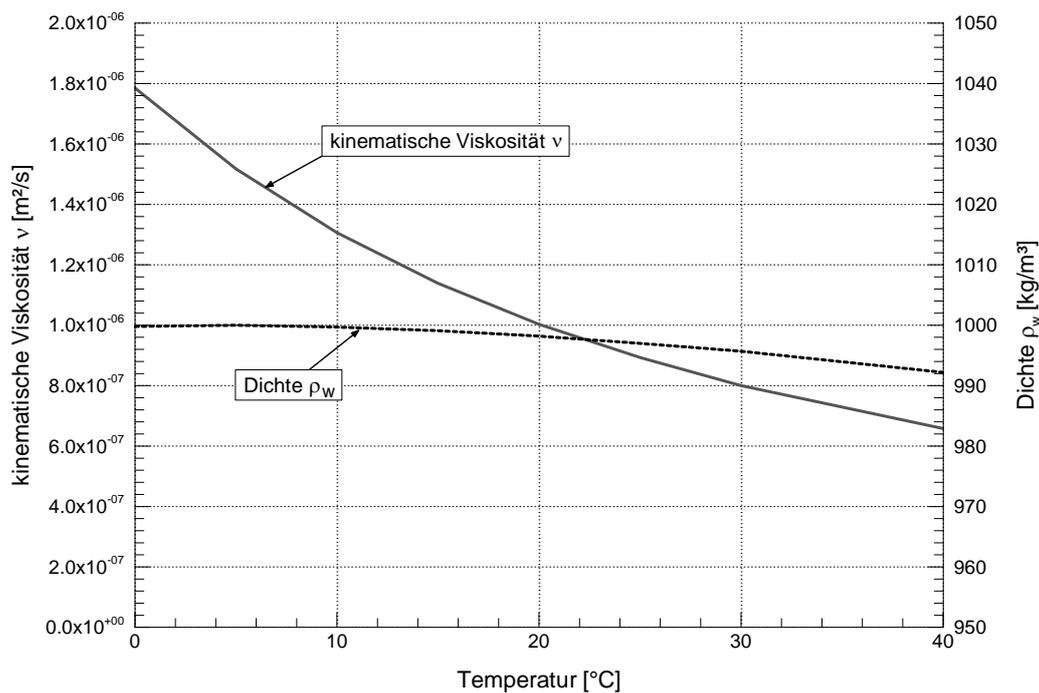


Abbildung 2.6: Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität und der Dichte von Wasser

Es entsteht ein Energieverlust aufgrund der Reibung in der Strömung durch die engen tortuosen Pfade der porösen Matrix. Bei turbulenten Bewegungen strömen die Fluidpartikel nicht mehr auf geordneten parallelen Bahnen, sondern bewegen sich chaotisch auf unregelmäßigen Bahnen durch die Zwischenräume des Porenraums. Daraus resultiert ein schnelles und kontinuierlich makroskopisches Vermischen der Fluidpartikel untereinander (STREET et al., 1996; HLUSHKOU & TALLAREK, 2006).

### 2.2.3 Betrachtungsmaßstäbe für die Strömung im porösen Medium

Wichtig für die Betrachtung von Strömungsprozessen ist das Widerstandsverhalten als Beziehung zwischen dem Druckverlust  $\Delta h$  über der durchströmten Länge  $\Delta l$  im Verhältnis zur über den Fließquerschnitt gemittelten Geschwindigkeit  $v_f$ . Dafür wird für geringe Strömungsgeschwindigkeiten im laminaren Bereich, wie sie in der unbeeinflussten Grundwasserströmung vorkommen, das Widerstandsgesetz nach DARCY (1856) mit dem Proportionalitätsfaktor  $k_f$  als hydraulische Durchlässigkeit verwendet.

$$\frac{Q}{A} = v_f = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.9)$$

Der Durchfluss  $Q$  pro Fläche  $A$  wird als Filtergeschwindigkeit oder spezifischer Durchfluss  $v_f$  bezeichnet und stellt eine fiktive Größe dar, welche sich einstellen würde, wenn das Wasser in einer offenen Röhre gleichmäßig strömt und dabei den gesamten Querschnitt ausfüllt. Die Fil-

tergeschwindigkeit ist ein makroskopisches Konzept und sehr einfach zu messen. Sie muss deutlich unterschieden werden von den mikroskopischen Geschwindigkeiten, welche den tatsächlichen Weg eines Wasserpartikels durch die poröse Matrix beschreiben. Diese mikroskopischen Geschwindigkeiten sind die wirklichen Fließgeschwindigkeiten, aber als solche praktisch nicht messbar (FREEZE & CHERRY, 1979). Die Ansammlung von Körnern in der porösen Matrix wird daher ausgetauscht durch ein repräsentatives Kontinuum, für welches makroskopische Parameter wie die hydraulische Durchlässigkeit definiert werden.

Das Wasser im Boden fließt nicht auf geraden Bahnen durch das weitverzweigte Porensystem. Es hat damit eine höhere Geschwindigkeit, welche als Porengeschwindigkeit bezeichnet wird. Für eine makroskopische Betrachtung der Grundwasserströmung ist nicht die Strömung in jeder Pore um das einzelne Bodenkorn wichtig, sondern eine gemittelte Geschwindigkeit über ein repräsentatives Elementarvolumen. Dafür wird der Begriff der Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  eingeführt, welche die theoretische Geschwindigkeit eines Wasserteilchens bei senkrecht zum Querschnitt angenommener Strömungsbahn beschreibt. In Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und der Kornform sowie dem Durchmesser der Bodenkörner lässt sich die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  mit dem effektiven Porengehalt  $n_{eff}$  darstellen.

$$v_f = n_{eff} \cdot v_a \quad (2.10)$$

In Abbildung 2.7 ist schematisch der Zusammenhang zwischen der als spezifischer Durchfluss bezeichneten mittleren Fließgeschwindigkeit  $v_f$  und dem Druckverlust über durchströmter Länge, dem hydraulischen Gradienten  $i$ , dargestellt. Bei kleinen Fließgeschwindigkeiten und damit geringen Gradienten gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen, welcher erstmals von DARCY (1856) in einem Versuch experimentell nachgewiesen wurde. Mit steigenden Fließgeschwindigkeiten und zunehmendem Gradienten wurde anhand zahlreicher experimenteller Untersuchungen (z. B. LINDQUIST, 1933; ROSE, 1945; SCHNEEBELI, 1955; HUBBERT, 1956; NAGY & KARADI, 1961; LUDEWIG, 1967; WRIGHT, 1968) festgestellt, dass kein linearer Zusammenhang mehr existiert. Aufgrund der Porenstruktur des Mediums kommt es allerdings nicht zu einem schlagartigen Wechsel vom laminaren zum turbulenten Strömungsverhalten, sondern zu einem graduellen Übergang.

Mit dem Anwachsen der Trägheitskräfte gegenüber den Reibungskräften wird der lineare Zusammenhang aufgehoben, die Strömung bleibt jedoch zunächst laminar. Erst mit weiterer Zunahme des Gradienten kommt es zu ersten Turbulenzerscheinungen, bis bei einem weiteren Anstieg die Trägheitskräfte dominieren und sich vollturbulente Verhältnisse ausbilden.

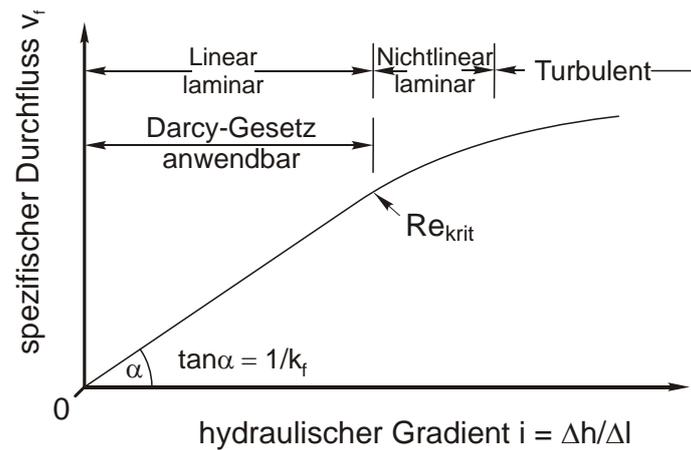


Abbildung 2.7: Hydraulischer Gradient  $i$  und spezifischer Durchfluss  $v_f$  in den verschiedenen Regimebereichen linear laminar, turbulent und nichtlinearer laminarer Übergangsbereich, verändert nach FREEZE & CHERRY (1979)

Als charakteristische Kennzahl für den Übergang von reibungsbedingter zu trägheitsbedingter Strömung im porösen Medium hat sich die Reynoldszahl  $Re$  als Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften in der Forschung etabliert

$$Re = \frac{v_f \cdot d_{char}}{\nu} \quad (2.11)$$

mit dem spezifischen Durchfluss  $v_f$  und der charakteristischen Länge  $d_{char}$  sowie der kinematischen Viskosität  $\nu$ . Als Darstellung von Versuchsergebnissen wird daher auch häufig eine dimensionslose Darstellung in Form eines Widerstandsbeiwerts  $\xi$  über der Reynoldszahl  $Re$  wie in Abbildung 2.8 gewählt. Dabei ist der Widerstandsbeiwert nach FANNING wie folgt definiert (BEAR, 1972):

$$\xi = \frac{g \cdot d_{char}}{2 \cdot v_f^2} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.12)$$

Mit Zunahme der Reynoldszahl  $Re$  weicht der Reibungs- oder Widerstandsbeiwert  $\xi$  von dem linearen Kurvenverlauf ab. Ab welcher kritischen Reynoldszahl  $Re_{krit}$  kein linearer Zusammenhang mehr zwischen  $Re$  und  $\xi$  besteht, ist anhand der Versuchsergebnisse in der Literatur nicht eindeutig definiert. Da keine scharfen Grenzen zwischen den einzelnen Regimen existieren, werden sie durch die Angabe von unterschiedlichen Reynoldszahlenbereichen, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, quantifiziert (BURCHARTH & ANDERSEN, 1995).

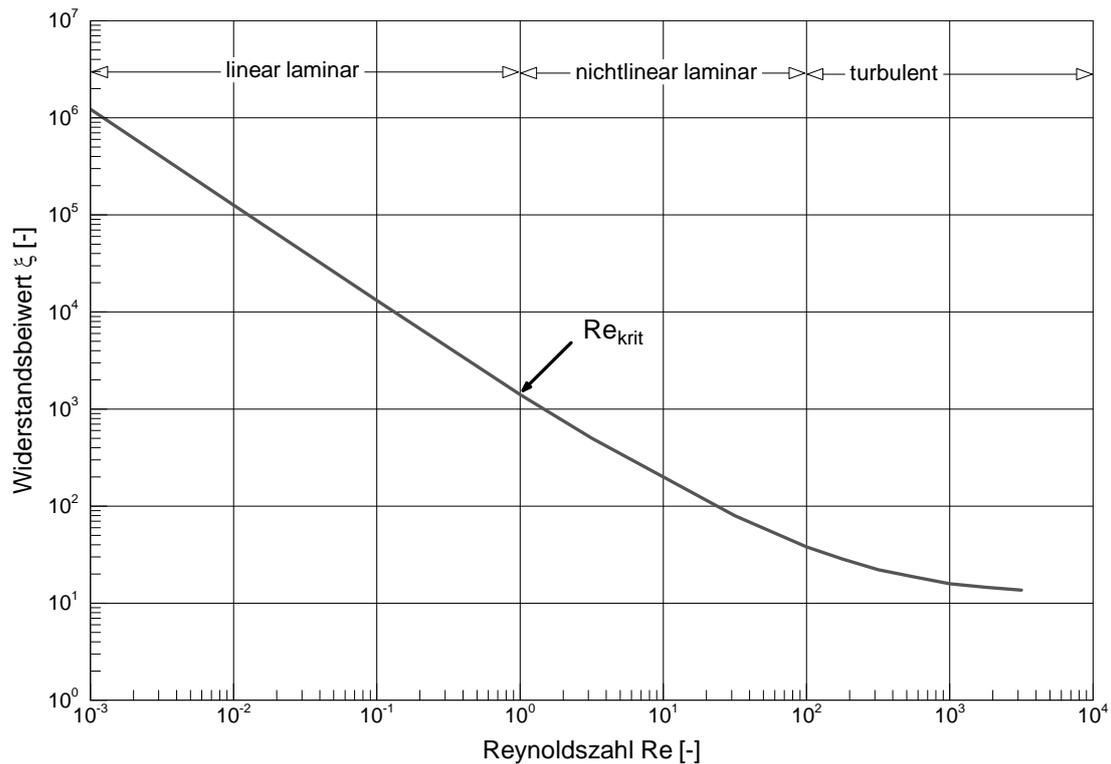


Abbildung 2.8: Beziehung zwischen dem Widerstandsbeiwert und der Reynoldszahl in logarithmischer Darstellung für die Strömung durch poröse Medien, verändert nach ROSE (1945)

Aufgrund der unterschiedlichen Annahmen für die charakteristische Länge  $d_{char}$  und der Einflüsse der geometrischen Eigenschaften der porösen Matrix auf den Fließvorgang wird nach HLUSHKOU & TALLAREK (2006) eine untere Grenze von  $Re = 1$  angegeben, ab welcher kein linearer Zusammenhang mehr besteht. Danach folgt ein nichtlinear laminarer Übergangsbereich, bis mit steigender Reynoldszahl  $Re$  und anwachsender Fließgeschwindigkeit turbulente Verhältnisse erreicht werden. Welche Reynoldszahl den Beginn des Turbulenzbereiches kennzeichnet, wird auch wieder anhand der Versuchsergebnisse unterschiedlich angegeben und variiert zwischen  $Re = 100$  und  $Re = 800$ .

Tabelle 2.1: Beispielhafte Reynoldszahlen für die Abgrenzung der Regimebereiche

Autor	DARCY-Regime	Übergangsregime	Turbulentes Regime
BEAR (1972)	$Re < 1 - 10$	$Re < 100$	$Re > 100$
DYBBS & EDWARDS (1984)	$Re < 1$	$5 < Re < 80$	$Re > 120$
FAND et al. (1987)	$Re < 2.3$	$5 < Re < 80$	$Re > 120$
TRUSSELL & CHANG (1999)	$Re < 1$	$1 < Re < 100$	$Re > 800$
HLUSHKOU & TALLAREK (2006)	$Re < 1$	$1 < Re < 500$	$Re > 500$

Zusammenfassend sind nach BEAR (1972) für die Abweichungen der Strömung vom DARCY-Gesetz die Trägheitskräfte entscheidend, weil sie zu Turbulenzerscheinungen führen. Diese

Kräfte sind immer präsent, aber sie werden im Vergleich zu den Reibungskräften nur sukzessiv dominant bei anwachsender Reynoldszahl. Daher wird häufig versucht, die Abweichungen durch das Abreißen der Strömung bei großen Reynoldszahlen aufgrund der Trägheitskräfte an mikroskopischen Punkten im Porenraum zu erklären, an denen die Strömung divergiert oder gekrümmt wird.

Tabelle 2.2: Auflistung verschiedener kritischer Reynoldszahlen für den Beginn der Abweichung der Strömung vom linear laminaren DARCY-Bereich mit Angabe der Korngrößenbereiche, für welche die Reynoldszahlen ermittelt wurden

Autor	Formel für Re	Re <sub>krit</sub> [-]	Korngröße [mm]
WARD (1964)	$Re = \frac{v_f \cdot \sqrt{K}}{\nu}$	0.182	0.273 – 16.1
LUDEWIG (1967)	$Re = \frac{v_f \cdot d_w}{(1-n) \cdot \nu \cdot c_{GH}}$	1	0.4 – 10
BURCHARTH & ANDERSEN (1995)	$Re = \frac{v_f \cdot d_{char}}{\nu}$	1	1 – 200
CHAUVETEAU & THIRRIOT (1967)	$Re = \frac{v_f \cdot d}{\nu}$	2	4 – 12
NAGY & KARADI (1961)	$Re = \frac{v_f \cdot d_{50}}{\nu}$	5	0.15 – 12
WILLIAMS (1985)	$Re = \frac{v_f \cdot d_{50}}{\nu}$	30	0.15 – 5.43
COMITI et al. (2000)	$Re = \frac{4 \cdot v_f \cdot T}{\nu \cdot S_v \cdot (1-n)}$	4	1.12 – 5

Der Einfluss der Kornform, -größe und Lagerungsdichte zeigt sich bei den unterschiedlich ermittelten kritischen Reynoldszahlen für die einzelnen Regimebereiche. Die Tabelle 2.2 gibt eine Zusammenstellung von kritischen Reynoldszahlen für den linear laminaren Bereich mit Angabe der jeweils zugrunde liegenden Formel für die Reynoldszahl und dem untersuchten Korngrößenbereich. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander und die exakte Beschreibung der Strömungsverhältnisse werden durch die Annahme unterschiedlicher charakteristischer Korndurchmesser, welche in der jeweiligen Formel für die Reynoldszahl in Tabelle 2.2 verwendet wird, jedoch erschwert (COMITI et al., 2000). Die Porosität oder Tortuosität wird auch nicht immer für die Ermittlung der Reynoldszahl berücksichtigt. Allgemein kann nach CHHABRA (2007) ein Reynoldszahlenbereich von 1 bis 30 für den Beginn der Abweichung vom linear laminaren DARCY-Bereich angenommen werden. Diese Einschätzung deckt sich mit den Werten in Tabelle 2.2. Lediglich WARD (1964) gibt eine geringere Reynoldszahl

an, verwendet dabei aber auch die Quadratwurzel der spezifischen Permeabilität  $K$  als charakteristische Länge und keinen Korndurchmesser des porösen Mediums.

Für die einzelnen Regimebereiche werden basierend auf theoretischen Modellen für das poröse Medium mathematisch beschreibbare Beziehungen zwischen dem dynamischen Verhalten der Strömung und den Matrixeigenschaften nachfolgend hergeleitet.

## 2.3 Ansätze zur Beschreibung der Strömung im porösen Medium

Die Korrelation des Druckverlustes zum Durchfluss beim Durchströmen eines porösen Mediums kennzeichnet das Widerstandsverhalten der porösen Matrix. Generell sind, wie eben beschrieben, drei verschiedene Regimebereiche zu unterscheiden (HLUSHKOU & TALLAREK, 2006, vgl. auch Abbildung 2.7):

- Linear laminarer Bereich, in welchem die Reibungskräfte dominieren und ein linearer Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und dem spezifischen Durchfluss besteht (DARCY-Regime)
- Nichlinear laminarer Bereich, in welchem Trägheitskräfte zunehmen, die Strömung aber noch laminar ist (FORCHHEIMER-Regime)
- Turbulenter Bereich, in welchem die Trägheitskräfte dominieren (turbulentes FORCHHEIMER-Regime)

Der Übergang zwischen den einzelnen Regimebereichen wird häufig zusätzlich als eigenes Übergangsregime angesehen (DYBBS & EDWARDS, 1984; FAND et al., 1987; BURCHARTH & ANDERSEN, 1995; TRUSSELL & CHANG, 1999). Ein universales Widerstandsgesetz, welches für alle Strömungsregime mit allgemeinen Koeffizienten gültig ist, wird nicht ableitbar sein, da das Widerstandsverhalten des porösen Mediums von der Kornform, der Korngröße und der Packungsstruktur abhängt (RUMPF & GUPTA, 1971). Diese komplexe Matrix ist auf der Porenebene durch die vereinfachenden Porenraummodelle nicht mathematisch beschreibbar, so dass viele Einflüsse nur durch empirische Koeffizienten in der Makroebene abgebildet werden. Diese Koeffizienten werden dann für die einzelnen Regimebereiche angepasst. Im Weiteren wird das Widerstandsverhalten für die einzelnen Strömungsregime beschrieben.

### 2.3.1 Strömung im linear laminaren Regime

Fasst man die Hohlräume einer porösen Matrix in erster Näherung als Bündel paralleler Porenkapillaren auf (Kapillarmodell), so kann das Fließgesetz nach HAGEN (1839) und POISEUILLE (1843) für laminare Strömungen ohne Einfluss von Trägheitskräften in kreiszylindrischen Röhren auf die Strömung in porösen Medien übertragen werden. Setzt man für den Rohrdurchmesser einen mittleren Kapillardurchmesser  $d_{kap}$  an, so erhält man den Druckver-

lust  $\Delta h$  bezogen auf den Kapillarabschnitt  $\Delta l_{kap}$  in Abhängigkeit der Kapillargeschwindigkeit  $v_{kap}$ .

$$\frac{\Delta h}{\Delta l_{kap}} = \frac{32 \cdot \nu}{g} \cdot \frac{v_{kap}}{d_{kap}^2} \quad (2.13)$$

Da die reale poröse Matrix nicht aus geraden Porenkapillaren mit konstantem Querschnitt besteht, muss eine Approximation für die Fließgeschwindigkeit und den Kapillardurchmesser gefunden werden (TRUSSELL & CHANG, 1999). Die Kapillargeschwindigkeit wird nach DUPUIT (1863) als mittlere Porengeschwindigkeit  $v_{pm}$  bezogen auf die Porosität  $n$  abgeschätzt. Für die Approximation des Kapillardurchmessers wird das Konzept des hydraulischen Radius nach KOZENY (1927) eingeführt. Der hydraulische Radius  $R_{hy}$  wird definiert als Verhältnis zwischen dem Porenanteil  $n$  und der gesamten benetzten Kornoberfläche  $S$ . Der Ansatz von KOZENY (1927) wird durch CARMAN (1937) ergänzt, indem er die benetzte Kornoberfläche durch Einführung einer spezifischen Oberfläche  $S_v$  als Funktion der Porengeometrie ausdrückt.

$$R_{hy} = \frac{n}{S} = \frac{n}{S_v(1-n)} \quad (2.14)$$

Die Substitution des Kapillardurchmessers einer kreisrunden Kapillare durch ihren hydraulischen Radius  $d_{kap} = 4 \cdot R_{hy}$  ergibt die Gleichung (2.15) nach KOZENY-CARMAN (CARMAN, 1937)

$$\frac{\Delta h}{\Delta l} = c_o \cdot \frac{\nu}{g} \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot S_v^2 \cdot v_{pm} \quad (2.15)$$

mit der KOZENY-CARMAN-Konstante  $c_o$ . Dieser Ansatz versucht, die Eigenschaften der porösen Matrix über die Kornoberfläche zu berücksichtigen. Wird das natürliche Korngemisch eines porösen Mediums durch eine monodisperse Kugelschüttung ersetzt, so entspricht der Durchmesser der Kugeln  $d_k$  einem wirksamen Korndurchmesser  $d_w$  des Korngemisches. Die spezifische Kornoberfläche wird dann definiert als Summe der Kugeloberflächen zum Gesamtvolumen der Kugeln:

$$S_v = \frac{\pi \cdot d_k^2}{\frac{\pi}{6} \cdot d_k^3} = \frac{6}{d_k} \quad (2.16)$$

Schwierig ist jedoch in diesem Zusammenhang die Bestimmung der experimentellen KOZENY-CARMAN-Konstante  $c_o$  und der Kornoberfläche eines natürlichen Korngemisches. CAR-

MAN (1937) verwendet die Arbeiten von KOZENY (1927) sowie zu dieser Zeit vorhandene experimentelle Daten zur Ableitung der Aussage, dass  $c_o$  ungefähr 5 beträgt.

Die Übertragung des Rohrströmungsgesetzes nach HAGEN-POISEUILLE für laminare Fließverhältnisse ergibt eine lineare Beziehung zwischen der Fließgeschwindigkeit und dem Druckgefälle mit dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  als Proportionalitätskonstante in der allgemeinen Form, welche auch als das Gesetz von DARCY bekannt ist (vgl. Kapitel 2.2.3).

$$\frac{Q}{A} = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} = k_f \cdot i \quad (2.17)$$

Die Strömung im Grundwasser nach dem Gesetz von DARCY besagt, dass die eine Flächeneinheit  $A$  durchströmende Wassermenge dem Druckhöhenunterschied  $\Delta h$  und dem Durchlässigkeitskoeffizienten  $k_f$  direkt und der Fließlänge  $\Delta l$  umgekehrt proportional ist. Dieses experimentelle Gesetz lässt sich auch analytisch durch die Methode der Homogenisierung (MEI & AURIAULT, 1991; SKJETNE & AURIAULT, 1999; CHEN et al., 2001) oder Volumenmittelung über ein repräsentatives Elementarvolumen REV (WHITAKER, 1986; DU PLESSIS, 1994; LIU & MASLIYAH, 1996; WHITAKER, 1996; WOOD, 2007) aus der NAVIER-STOKES-Gleichung ableiten, wenn die Trägheitskräfte vernachlässigt werden.

Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  ist eine von den Fluideigenschaften und den Aquifereigenschaften abhängige charakteristische Größe mit der Dimension einer Geschwindigkeit [L/T]. Er wird beeinflusst von der spezifischen Permeabilität des Porensystemes  $K$ , also dem Porenvolumen und der Korngröße, der Dichte  $\rho_w$  und der dynamischen Viskosität  $\mu$  des strömenden Mediums sowie der Erdbeschleunigung  $g$ .

$$k_f = \frac{\rho_w}{\mu} \cdot g \cdot K \quad (2.18)$$

### 2.3.2 Strömung im nichtlinear laminaren Regime

Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit, welche zum Beispiel im Grundwasserleiter im Nahbereich bei der Anströmung eines Brunnens auftreten kann, nimmt der Einfluss der Trägheitskräfte zu und das Strömungsregime befindet sich im Übergangsbereich. Der hydraulische Gradient wächst überproportional zur Fließgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 2.7). Aufgrund der porösen Struktur des Untergrundes mit einer weitverzweigten Porengeometrie und den tortuosen Porenpfaden existiert kein definierter Umschlagspunkt zum turbulenten Regime (BEAR, 1972).

FORCHHEIMER (1901) hat zur Anpassung von experimentellen Untersuchungen eine allgemeine Gleichung zur Beschreibung des Widerstandsverhaltens der Strömung in porösen Medien

aufgestellt, welche mit einem quadratischen Term auch das nichtlineare Verhalten dieses Übergangsbereiches abbildet.

$$i = a_F \cdot v_f + b_F \cdot v_f^2 \quad (2.19)$$

Dabei berücksichtigt der erste Term auf der rechten Seite die Reibungsverluste (viskoser Term), während der zweite Term die Verluste aufgrund der anwachsenden Trägheitskräfte abbildet (kinetischer Term). Wird Gleichung (2.19) durch den spezifischen Durchfluss  $v_f$  dividiert und anschließend graphisch dargestellt (vgl. Abbildung 2.9), so sind die FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  und  $b_F$  die Steigung und der Achsenabschnitt. Nach der Theorie von FORCHHEIMER (1901) hängt die Form des Widerstandsgesetzes von dem Turbulenzgrad der Strömung ab, so dass bei anwachsender Fließgeschwindigkeit das DARCY-Gesetz nicht mehr gültig und der quadratische Term nicht mehr vernachlässigbar ist.

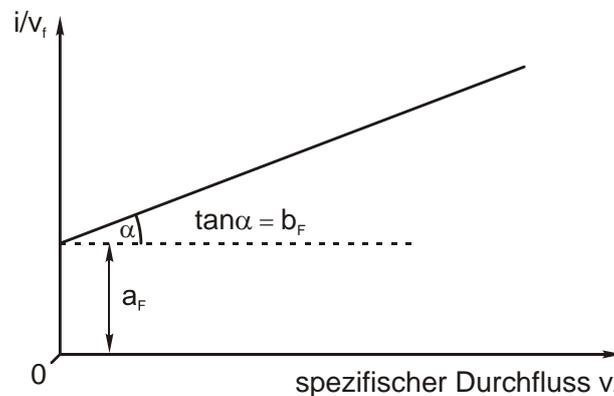


Abbildung 2.9: Darstellung der FORCHHEIMER-Gleichung mit der Bedeutung der FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  und  $b_F$

Zur Beschreibung der FORCHHEIMER-Koeffizienten wurde in den meisten bisherigen Arbeiten entweder die poröse Matrix als räumliches Röhrenmodell abstrahiert (Kapillarmodell) oder eine Dimensionsanalyse durchgeführt. Die Parameter, welche die poröse Matrix beschreiben, wurden dann durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen bestimmt. Neben der Porosität  $n$ , welche in fast jedem Ansatz zu finden ist, wird zum Beispiel der Einfluss folgender geometrischer Parameter untersucht:

- Struktur des Porensystems (TESSENDORFF, 1962; MAECKELBURG, 1966)
- Anordnung der Partikel (ERGUN, 1952; VALENTIN, 1970; RUMPF & GUPTE, 1971; MACDONALD et al., 1979)
- Kornform (LUDEWIG, 1967)
- Korngrößenverteilung, dargestellt in Form von Mittelwerten (RUMPF & GUPTE, 1971) oder dem hydraulischen Radius nach KOZENY (ERGUN, 1952)
- Tortuosität (WITTMANN, 1980)

Der Einfluss der statistischen Verteilung der hydraulisch bedeutsamen Parameter wurde von LEHNERS (1993) untersucht. Eine Übersicht verschiedener Widerstandsgesetze enthält Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Übersicht verschiedener Widerstandsgesetze

Autor	Widerstandsgesetz
ERGUN (1952)	$i = 150 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_k^2} \cdot v_f + 1.75 \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_k} \cdot v_f^2$
TESSENDORF (1962)	$i = 207 \cdot \frac{1-n}{n^2} \cdot \sqrt{\frac{1-n}{n}} \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot v_f + 2.97 \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{1}{g \cdot d_w} \cdot v_f^2$
MAECKELBURG (1966)	$i = 2 \cdot \frac{1-n}{n} \cdot \sqrt{\frac{1}{(\lg(10/n))^3 \cdot \pi}} \cdot \frac{1.5 \cdot (1-n) + d_{kw} / D_f}{n \cdot d_{kw}} \cdot \frac{v_{pm}^2}{2g}$
LUDEWIG (1967)	$i_{krit} = 0.56 \cdot \frac{a_{form} \cdot 1.2 \cdot U^{-0.46}}{k_f^{1.1}}$
RUMPF & GUPTE (1971)	$i = \frac{5.6 \cdot v}{g \cdot d_k^2} \cdot n^{-5.5} \cdot v_f$
MACDONALD et al. (1979)	$i = 180 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_k^2} \cdot v_f + 1.8 \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_k} \cdot v_f^2$
WITTMANN (1980)	$i = 72 \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot v_f \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3 \cdot T^2} + \frac{\xi_w}{2g \cdot d_w} \cdot v_f^2 \cdot \frac{1}{n^2 \cdot T^2}$
LEHNERS (1993)	$i = 720 \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{(1-n)^2}{n^2} \cdot v_{pm}$

ERGUN (1952) weist außerdem experimentell nach, dass die FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  und  $b_F$  von der Porosität abhängen. Das meist zitierte Widerstandsgesetz ist die Gleichung von ERGUN (1952) und wird in allgemeiner Form in Gleichung (2.20) dargestellt:

$$i = \underbrace{A_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_k^2}}_{a_F} \cdot v_f + \underbrace{B_E \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_k}}_{b_F} \cdot v_f^2 \quad (2.20)$$

Die Ermittlung des linearen ERGUN-Koeffizienten  $A_E$  und des nichtlinearen ERGUN-Koeffizienten  $B_E$  ist seitdem vorrangig für Festbetten (Packungen) in der chemischen Industrie Gegenstand der Forschung (siehe zum Beispiel MAECKELBURG, 1966; RUMPF & GUPTE, 1971; MACDONALD et al., 1979; FAND et al., 1987; DU PLESSIS, 1994; NEMEC & LEVEC, 2005).

Die generelle Abhängigkeit der FORCHHEIMER-Koeffizienten von der Reynoldszahl wird durch Untersuchungen von FAND et al. (1987) experimentell bestätigt und aufbauend auf dem Widerstandsgesetz nach ERGUN (1952) werden leicht veränderte ERGUN-Koeffizienten für beide Terme vorgeschlagen (vgl. Tabelle 2.4).

Die Strömung durch ein poröses Medium mit konvergierenden Rändern wird von THIRUVEN-GADAM & KUMAR (1997), VENKATARAMAN & RAO (2000) und REDDY (2006) experimentell anhand eines Konvergenz-Permeameters untersucht. Dabei wird die Gültigkeit der FORCHHEIMER-Gleichung auch für diesen Strömungstyp nachgewiesen. Der Einfluss konvergierender Ränder auf das Widerstandsgesetz, welches den Widerstandsbeiwert  $\xi$  mit der Reynoldszahl  $Re$  korreliert, wird unter Verwendung der Quadratwurzel der spezifischen Permeabilität  $\sqrt{K}$  als charakteristische Länge  $d_{char}$  von REDDY (2006), REDDY (2005) und REDDY & RAO (2006) untersucht. Es wird anhand der Untersuchungsergebnisse gezeigt, dass sich die FORCHHEIMER-Koeffizienten in radialer Richtung ändern und abhängig von der Partikelgröße des verwendeten porösen Mediums sind. Die Reynoldszahl nimmt im untersuchten Bereich von 1 bis 12 mit abnehmendem Widerstandsbeiwert für jedes Radienverhältnis  $r_1/r_2$  zu.

TRUSSELL & CHANG (1999) leiten auf der Grundlage des Ansatzes von AHMED & SUNADA (1969) unter Verwendung des Hydraulischen-Radius-Konzeptes eine Widerstandsgleichung (2.21) für das nichtlinear laminare Regime her, welche im Unterschied zur ERGUN-Gleichung (2.20) statt eines Kugeldurchmessers  $d_k$  einen charakteristischen Partikeldurchmesser  $d_{char}$  verwendet. Somit wird die Einschränkung der ERGUN-Gleichung, welche nach NEMEC & LEVEC (2005) nur für kugelförmige Partikel exakte Druckverluste vorhersagt, durch die Gleichung (2.21) von TRUSSELL & CHANG (1999) aufgehoben. Außerdem wird statt der spezifischen Oberfläche  $S_v$  ein von FAIR & HATCH (1933) eingeführter Flächen-Volumen-Formfaktor  $S_{FH}$  mit  $S_{FH} = S_v \cdot d_{char}$  verwendet.

$$i = 2 \cdot T \cdot S_{FH}^2 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_{char}^2} \cdot v_f + \sqrt{\frac{2 \cdot T}{c}} \cdot S_{FH} \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_{char}} \cdot v_f^2 \quad (2.21)$$

Die ERGUN-Koeffizienten hängen somit von der Tortuosität  $T$  und dem Flächen-Volumen-Formfaktor  $S_{FH}$  ab, beides sind geometrische Parameter der Mikrostruktur eines porösen Mediums (VALDÉS-PARADA et al., 2010). Zur Ermittlung von Druckverlusten auf der Makroskala eines porösen Mediums sind die beiden Parameter  $T$  und  $S_{FH}$  nicht geeignet, da keine belastbaren Messmethoden für ihre direkte Ermittlung vorhanden sind. Lediglich eine indirekte Zurückrechnung der Tortuosität aus FORCHHEIMER-Koeffizienten wird von COMITI & RENAUD (1989) vorgeschlagen und eine Bestimmung der dreidimensionalen Kornform aus der zweidimensionalen Bildanalyse ist nach STROEVEN et al. (2009) möglich, aber noch sehr unsicher.

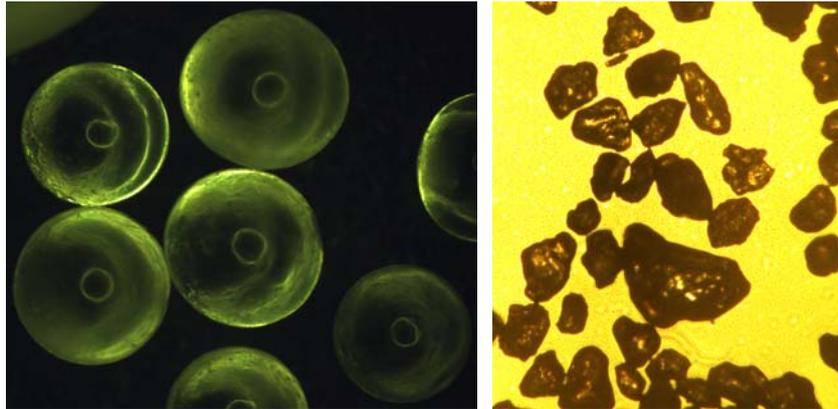


Abbildung 2.10: Mikroskopbilder von gleichförmigen Glaskugeln (links) und ungleichförmigen porösen Medium (rechts) bei unterschiedlichen Vergrößerungsverhältnissen

NEMEC & LEVEC (2005) unternehmen einen Versuch zur Ableitung allgemeiner ERGUN-Koeffizienten unter Berücksichtigung eines Formfaktors, welcher das Partikelvolumen ins Verhältnis zur Partikeloberfläche setzt. Dieser Ansatz ist jedoch nicht für Partikel mit einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis kleiner 0.5 zu verwenden und beinhaltet einen weiteren Fittingparameter, der für ungleichförmige Körner (vgl. Abbildung 2.10) schwierig zu messen ist.

Außerdem hat die Packungsstruktur, welche sich aus der Partikelorientierung ergibt, einen Einfluss auf den Durchflusswiderstand (NEMEC & LEVEC, 2005). Für diesen Einfluss existieren allerdings keine Zusammenhänge mit anderen Parametern und nur von RUMPF & GUPTA (1971) wird dieses Verhalten durch einen nicht näher definierten Strukturparameter berücksichtigt.

Für den Beginn der Abweichung vom DARCY-Gesetz wird neben der quadratischen Ergänzung durch FORCHHEIMER (1901) von mehreren Autoren eine kubische Gleichung mit einem dimensionslosen Parameter  $\lambda$  für den nichtlinearen Term vorgeschlagen.

$$i = \frac{\mu}{K} \cdot v_f + \frac{\lambda \cdot \rho_w^2}{\mu} \cdot v_f^3 \quad (2.22)$$

Diese Gleichung wird aus zweidimensionalen numerischen Untersuchungen sowie der Homogenisierung eines isotropen homogenen porösen Mediums abgeleitet (MEI & AURIAULT 1991; FOURAR et al. 2004). FIRDAOUSS et al. (1997) ermitteln bei der Analyse von Literaturdaten zu experimentellen Untersuchungen eine gute Übereinstimmung der kubischen Gleichung mit den experimentellen Daten.

Nach HASSANIZADEH & GRAY (1987) ist die viskose Kraft auf der Porenebene die Quelle der Nichtlinearität. Diese Aussage wird auf der Basis einer gemittelten Momentengleichung abgeleitet. Andere Autoren (BARAK 1987; MEI & AURIAULT 1991) sehen in den Trägheitskräften den Auslöser für die Abweichungen. MA & RUTH (1993) zeigen, dass Trägheitskräfte die

Fließbahnen durcheinanderbringen und dadurch den Gradienten der Fließgeschwindigkeit erhöhen, was zu einem erhöhten Druckverlust führt. Diese Erklärung wurde auch von CHAVE-TEAU & THIRRIOT (1967) anhand der Visualisierung von Fließbahnen im zweidimensionalen porösen Modell bei verschiedenen Reynoldszahlen gefunden.

FOURAR et al. (2004) folgert, dass die experimentellen Ergebnisse, welche die Gleichung nach FORCHHEIMER (2.19) bestätigen, in dreidimensionalen porösen Medien ermittelt wurden. Im Gegensatz dazu wurden die numerischen Untersuchungen, welche die kubische Gleichung (2.22) bestätigen, häufig mit zweidimensionalen numerischen Modellen durchgeführt. FOURAR et al. (2004) hat daraufhin zweidimensionale und dreidimensionale numerische Untersuchungen an einem porösen Medium durchgeführt und die Abhängigkeit der Ergebnisse von der gewählten Dimension gezeigt. Der Übergangsbereich von einer linear laminaren Strömung zu einer nichtlinear laminaren Strömung wird in zweidimensionalen Modellen überbewertet und als Konsequenz daraus zeigt FOURAR et al. (2004), dass die nichtlinear laminare Strömung mit der FORCHHEIMER-Gleichung (2.19) gut abgebildet wird.

### 2.3.3 Strömung im turbulenten Regime

Auch für die Strömung im vollturbulenten Bereich wird die FORCHHEIMER-Gleichung als Widerstandsgesetz verwendet, wobei die Koeffizienten  $a_T$  und  $b_T$  dann für den geänderten Strömungszustand angepasst werden (BURCHARTH & ANDERSEN, 1995; TRUSSELL & CHANG, 1999).

$$i = a_T \cdot v_f + b_T \cdot v_f^2 \quad (2.23)$$

FAND et al. (1987) untersucht experimentell die Variation der FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  und  $b_F$  in Abhängigkeit der Reynoldszahl und wendet für den laminaren und turbulenten Regimebereich die ERGUN-Gleichung (2.20) mit jeweils neuen Koeffizienten an (siehe Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: ERGUN-Koeffizienten für den laminaren ( $A_E$  und  $B_E$ ) und den turbulenten ( $A_T$  und  $B_T$ ) Regimebereich in Abhängigkeit vom mittleren Glaskugeldurchmesser nach Untersuchungen von FAND et al. (1987) für einen Reynoldszahlenbereich von 0.18 bis 408

Mittlere Glaskugelgröße [mm]	Porosität [-]	$A_E$ [-]	$B_E$ [-]	$A_T$ [-]	$B_T$ [-]
2.098	0.357	184.2	1.925	198.8	1.892
3.072	0.360	177.8	1.902	218.3	1.638
4.029	0.359	174.0	1.811	216.8	1.545
3.690	0.348	180.6	1.920	237.1	1.593
3.276	0.344	183.5	1.935	227.6	1.690
2.759	0.342	179.5	1.882	223.8	1.616

In einem anderen Ansatz wird nur der quadratische Term der FORCHHEIMER-Gleichung mit der Begründung berücksichtigt, dass im turbulenten Regimebereich die Trägheitskräfte dominieren und die Reibungsverluste vernachlässigbar sind (BURCHARTH & ANDERSEN, 1995; HLUSHKOU & TALLAREK, 2006). BURKE & PLUMMER (1928) beschreiben anhand experimenteller Daten den Druckverlust in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit mit

$$i = b_T \cdot v_f^2. \quad (2.24)$$

Der Koeffizient  $b_T$  wird häufig als Nicht-DARCY-Koeffizient bezeichnet und beinhaltet alle Einflüsse aus der porösen Matrix. BURCHARTH & ANDERSEN (1995) verwenden einen erweiterten Ansatz für den turbulenten Regimebereich, der auf der Annahme basiert, dass ein kritischer Gradient bei einer kritischen Reynoldszahl existiert, ab dem die Strömung turbulent wird.

$$i = i_{krit} + b_T \cdot (v_f - v_{f,krit})^2 \quad (2.25)$$

$$v_{f,krit} = \frac{Re_{krit} \cdot v}{d_{char}} \quad (2.26)$$

Für verschiedene charakteristische Korndurchmesser  $d_{char}$  von 1 mm bis 20 cm werden kritische Gradienten  $i_{krit}$  und kritische Filtergeschwindigkeiten  $v_{f,krit}$  in BURCHARTH & ANDERSEN (1995) angegeben.

## 2.4 Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Strömung im porösen Medium mit dem Hauptaugenmerk auf den Ansätzen zur Beschreibung der Strömung in verschiedenen Regimebereichen dargelegt. Da zahlreiche experimentelle Untersuchungen gezeigt haben, dass in Abhängigkeit vom durchströmten Material und der Porosität der lineare Zusammenhang zwischen dem Gradienten  $i$  (Druckverlust zu durchströmter Länge) und der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  ab einer kritischen Grenzgeschwindigkeit  $v_{f,krit}$  nicht mehr gegeben ist, werden verschiedene Widerstandsgesetze für den nichtlinear laminaren Regimebereich und das turbulente Strömungsregime abgeleitet.

Es ist seit langem bekannt, dass das lineare DARCY-Gesetz die Strömung durch poröse Medien bei höheren Geschwindigkeiten nicht adäquat beschreibt. Die Analyse der makroskopischen Eigenschaften der porösen Matrix, wie die spezifische Permeabilität, können verwendet werden, um den Beginn der Abweichungen vom DARCY-Gesetz für die Durchströmung von Säulen, welche mit porösen Material gefüllt sind, bei anwachsender Geschwindigkeit festzulegen. Es existieren zahlreiche empirische Beziehungen, welche den Druckverlust in Bezug

zur Fließgeschwindigkeit in verschiedenen Strömungsregimen darstellen, dennoch werden die physikalischen Prozesse, welche zur Abweichung vom DARCY-Gesetz führen, kontrovers diskutiert (HLUSHKOU & TALLAREK, 2006). Für die Unterscheidung der einzelnen Strömungsregime wird als dimensionslose Kennzahl die Reynoldszahl  $Re$  verwendet, da diese am besten untersucht ist.

In der Vergangenheit wurde eine große Anzahl an empirischen Widerstandsgesetzen (vgl. Tabelle 2.3) postuliert, welche die Strömung durch poröse Medien in verschiedenen Regimebereichen abhängig von den Eigenschaften des porösen Mediums beschreibt. Nach RUMPF & GUPTA (1971) ist jedoch ein generelles Widerstandsgesetz für alle Regimebereiche nicht vorhanden, da die charakteristische Durchlässigkeit eines porösen Mediums von den Verteilungsfunktionen der Kornform und der Korngröße sowie der Packungsstruktur abhängt. Diese komplexe Struktur beeinflusst auf der Porenebene das Widerstandsverhalten abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und damit der Reynoldszahl. Zur Ableitung von Widerstandsgesetzen werden die Einzelporen zu Porenräumen zusammengefasst und durch makroskopische Parameter vereinfacht dargestellt. Diese Ansätze kommen nach LEHNERS (1993) nicht ohne die Einführung einer Vielzahl von empirischen Beiwerten und Koeffizienten aus, welche für vergleichsweise eng gefasste Bedingungen gültig sind, da sie jeweils nur für den experimentell untersuchten Bereich nachgewiesen werden. Dadurch wird eine verallgemeinerte Anwendung stark eingeschränkt. Weiterhin werden in manchen Ansätzen die Einflüsse des Korngaufwerks derart hochgradig spezifiziert, dass die Unsicherheiten mit der Zahl der Parameter und dem Grad der Funktionen steigen.

Die FORCHHEIMER-Gleichung (2.19) zur Beschreibung des Widerstandsverhaltens beim Durchströmen wird nach Auswertung der umfangreichen Literatur als Grundlage für die Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ausgewählt. Im linear laminaren Regimebereich dominiert der lineare Term der FORCHHEIMER-Gleichung, welcher identisch mit dem DARCY-Gesetz ist. Als kritische Reynoldszahl, ab der das DARCY-Gesetz nicht mehr anwendbar ist, wird in der Literatur bei Verwendung eines charakteristischen Korndurchmessers häufig der Wert von 1 angesetzt. Danach schließt sich der nichtlinear laminare Übergangsbereich an, für den als obere Grenze vielfach eine kritische Reynoldszahl von 100 festgelegt wird. Im darauf folgenden turbulenten Strömungsregime dominiert der quadratische Term. Eine Zusammenstellung der ausgewählten kritischen Reynoldszahlen auf der Grundlage der Literaturanalyse enthält Tabelle 2.5. Eine Überprüfung dieser Werte für radiale Anströmbedingungen ist erforderlich. Die Anpassung der FORCHHEIMER-Koeffizienten muss durch experimentelle oder numerische Untersuchungen erfolgen, um den Einfluss der komplexen Struktur des verwendeten porösen Mediums zu berücksichtigen. Im Rahmen die-

ser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die FORCHHEIMER-Koeffizienten zu ermitteln.

Tabelle 2.5: Regimebereiche mit Angabe der kritischen Reynoldszahl und des zu verwendenden Fließgesetzes

Regimebereich	$Re_{krit}$ [-]	Fließgesetz
linear laminar	$< 1$	Darcy
nichtlinear laminar	$1 < Re_{krit} < 100$	Forchheimer
turbulent	$> 100$	Forchheimer mit angepassten Koeffizienten

Die Schwierigkeit bei der Beschreibung der Strömung in porösen Medien liegt in den Eigenschaften der porösen Matrix wie charakteristische Fließweglänge, Kornform und Porenverteilung, welche sich einer eindeutigen geometrischen Beschreibbarkeit entziehen. Daher werden die Prozesse im Rahmen dieser Arbeit aus praktischen Gründen nicht auf der mikroskopischen Ebene betrachtet, sondern es wird überwiegend eine makroskopische Herangehensweise mit einem repräsentativen Elementarvolumen gewählt. Dadurch ist es möglich, die poröse Matrix als homogenes Kontinuum mit einer über den Raum konstanten Durchlässigkeit aufzufassen. Die Auswahl eines geeigneten Porenraummodells innerhalb der FORCHHEIMER-Gleichung stellt dabei die Herausforderung dar.

Die Modellvorstellung von Kapillaren ist in der Literatur das am weitesten verbreitete Porenraummodell, so dass das Kapillarmodell mit Berücksichtigung des hydraulischen Radius und der Tortuosität, wie von TRUSSELL & CHANG (1999) mit Gleichung (2.21) vorgeschlagen, ausgewählt wird. Dadurch ist eine gute Vergleichbarkeit mit anderen Ergebnissen gegeben. Außerdem wird der Einfluss der komplexen Struktur der porösen Matrix durch die Tortuosität und den hydraulischen Radius gut abgebildet. Grundlegende Untersuchungen zur Ermittlung der Tortuosität von porösen Medien wie Sande oder Kiese sind jedoch bisher nicht vorhanden. Die Unsicherheit aufgrund der makroskopischen Behandlung des Porenraums ist im Rahmen dieser Arbeit zu analysieren und zu berücksichtigen.

## 3 Grundlagen der Brunnenanströmung

### 3.1 Vorbemerkungen

Nach der allgemeinen Betrachtung der Strömung in porösen Medien wird der Spezialfall der Anströmung eines Brunnens im Grundwasserleiter in diesem Kapitel vorgestellt. Ein Brunnen ist ein Bauwerk, welches im Untergrund erstellt wird, um das unterirdische Wasser zu fassen und mittels Pumpen an die Erdoberfläche zu transportieren. Brunnen werden zumeist als Bohrbrunnen ausgeführt, wobei verschiedene Bohrverfahren zur Anwendung kommen können. In das gebohrte Loch wird über die gesamte Länge ein Rohr eingebaut, welches in den durchlässigen grundwasserführenden Schichten perforiert ist, um das Wasser in den Brunnen eintreten zu lassen. In den gering durchlässigen Schichten wird ein Vollwandrohr eingebaut. Im Lockergestein wird der Ringraum zwischen der Bohrlochwand und dem Filterrohr mit einem porösen Schüttmaterial verfüllt, damit das umgebende Aquifermaterial nicht direkt durch die perforierten Filterrohre in den Brunnen eintritt. Durch diesen zusätzlichen Kornfilter können Filterrohre mit einer größeren Öffnungsweite verwendet werden. Die Öffnungsweite muss kleiner gewählt werden, wenn eine direkte Anpassung an das umgebende Aquifermaterial erfolgt. Zur Erschließung flacher Grundwasservorkommen werden Horizontalfilterbrunnen eingesetzt, während mächtigere Grundwasserleiter in beliebiger Tiefe mit Vertikalfilterbrunnen erschlossen werden. Reicht der Vertikalfilterbrunnen bis zur unteren, undurchlässigen Schicht, wird er als vollkommener Brunnen bezeichnet. Wenn die Bohrung nicht bis zur unteren, undurchlässigen Schicht abgeteuft wird, spricht man von einem unvollkommenen Brunnen.

### 3.2 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs

Aufgrund der radialen Strömung zum Brunnen ist der Gradient und damit die Fließgeschwindigkeit in Brunnennähe am größten. Auch chemische und physikalische Alterungsprozesse, welche die Brunnenleistung mit der Zeit reduzieren, treten im Brunnennahbereich auf. Daher wird der Betrachtungsbereich der Grundwasserströmung in dieser Arbeit auf den Brunnennahbereich begrenzt. Der Stand der Forschung zum Themenkomplex der Brunnenanströmung wird in diesem Kapitel anhand der einzelnen Prozesse im Untergrund bei der Bewegung des Grundwassers zum Brunnen vorgestellt. Dazu zeigt die Abbildung 3.1 eine Definitionsskizze mit der Einteilung der verschiedenen Untersuchungsbereiche. Zu Beginn werden in Kapitel 3.3 die Prozesse im Grundwasser bei der stationären Anströmung zum Brunnen betrachtet

(Bereich I). Besonderes Augenmerk liegt hier auf der Übertragung theoretischer und experimenteller Untersuchungen zur Strömung in porösen Medien auf die Brunnenanströmung im Nahbereich in verschiedenen Regimebereichen. Die Durchströmung des Schüttmaterials im Ringraum des Bohrlochs wird in Kapitel 3.4 untersucht (Bereich II). Abschließend werden in Kapitel 3.5 die Prozesse beim Eintritt des Wassers in das Filterrohr beschrieben (Bereich III). Da das Wasser auf dem Weg zum Brunneninnenraum durch drei verschiedene Materialien strömt, werden die Trennflächen mit ihren Widerständen gesondert betrachtet (Kapitel 3.6). Auf dieser Grundlage wird das Ziel der eigenen Untersuchung präzisiert und die weitere Vorgehensweise in Kapitel 3.7 erarbeitet.

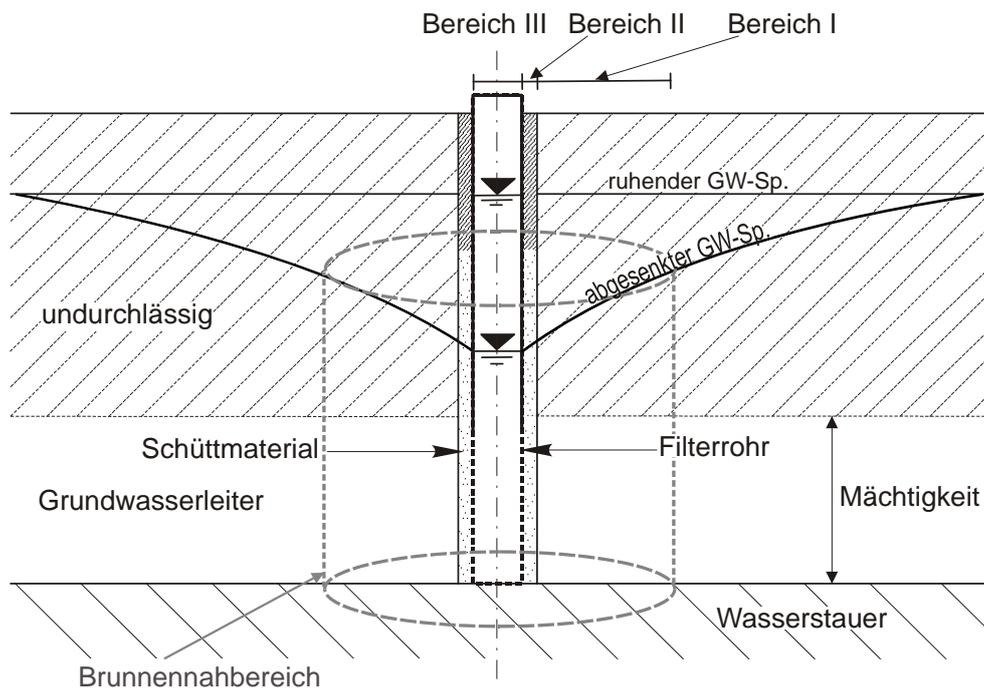


Abbildung 3.1: Schnitt durch einen Brunnen mit Darstellung der Zuströmung im gespannten Grundwasserleiter mit ruhendem und abgesenktem Grundwasserspiegel sowie dem Bohrlochausbau mit Schüttmaterial und Filterrohr.

### 3.3 Anströmung aus dem Aquifer in verschiedenen Regimebereichen

Die Fließgeschwindigkeit nimmt aufgrund der Kontinuitätsbedingung zum Brunnen hin zu, da sich die durchströmte Querschnittsfläche in Abhängigkeit des Radius reduziert. Für die Berechnung der Grundwasserströmung zum Brunnen müssen daher sowohl das linear laminare, das nichtlinear laminare als auch das turbulente Strömungsregime berücksichtigt werden.

### 3.3.1 Linear laminarer Regimebereich

Um den Wasserandrang zum Brunnen für linear laminare Fließverhältnisse zu berechnen, werden folgende – auch als DUPUIT-Annahmen bekannte – Annahmen zugrunde gelegt (BEAR, 1972):

- Unendlich ausgedehnter Grundwasserleiter
- Stationäre Strömung
- Isotropes und homogenes Speichergestein
- Horizontal-ebene Strömung, ohne vertikale Strömungskomponente
- Grundwasser und Speichergestein nicht kompressibel

Unter diesen Voraussetzungen fließt das Wasser eines gespannten oder ungespannten Grundwasserleiters dem Einzelbrunnen von allen Seiten aus gleichmäßig zu und es bildet sich ein parabelförmiger Absenktrichter, welcher sich in einer Entfernung  $R$  vom Brunnen an den ungestörten Grundwasserstand  $H$  asymptotisch anlegt.

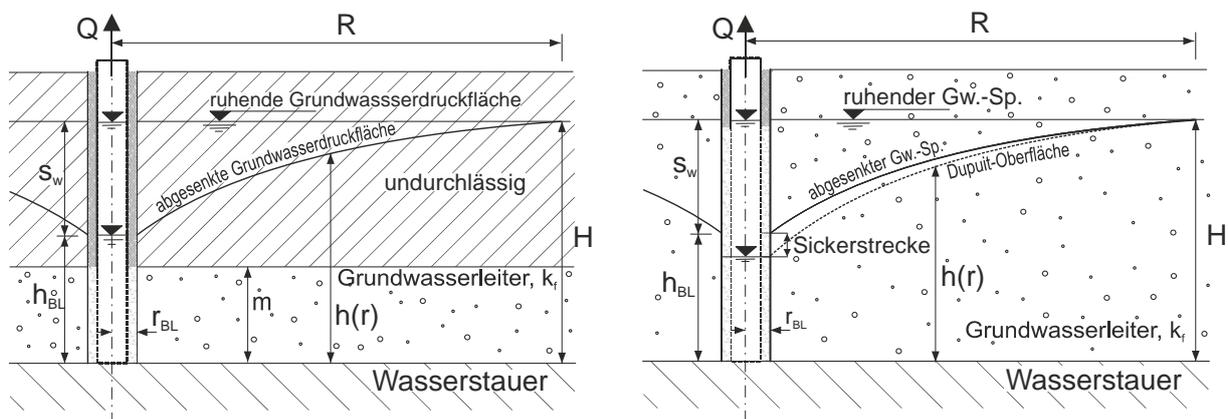


Abbildung 3.2: Definitionsskizze der Anströmung zum Brunnen bei gespannten (links) und ungespannten (rechts) Grundwasserverhältnissen

In Abbildung 3.2 wird ein Grundwasserleiter mit gespannter Oberfläche oben und unten durch eine relativ undurchlässige Schicht (Wasserstauer) begrenzt. Das Grundwasser füllt den gesamten durchlässigen Bereich mit der Mächtigkeit  $m$  und steht unter höherem Druck als der atmosphärische Druck. Dadurch ist der Wasserspiegel höher als die obere Begrenzung des Grundwasserleiters. Für diesen Spezialfall beschreibt die LAPLACE-Gleichung (3.1) in Polarkoordinaten das Potentialfeld der Grundwasserströmung und bildet daher die Ausgangsgleichung für die Ableitung einer Brunnenformel zur Berechnung der Wassermenge, die dem Brunnen aus dem Grundwasserleiter zuströmt.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (3.1)$$

Diese Differentialgleichung ist durch Substitution und zweimalige Integration bei gegebenen Randbedingungen unter den Annahmen von DUPUIT (1863) eindeutig lösbar (BUSCH et al., 1993). Für einen zylindrischen Querschnitt gilt nach dem Kontinuitätsgesetz mit der durchströmten Querschnittsfläche

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m \quad (3.2)$$

und der radialen Fließgeschwindigkeit

$$v_r = k_f \cdot \frac{dh}{dr} \quad (3.3)$$

nach DARCY aus Gleichung (2.9) der Durchfluss  $Q$  mit

$$Q = k_f \cdot \frac{dh}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m. \quad (3.4)$$

Die Auflösung nach  $dh$  und anschließende Integration dieser Gleichung liefert

$$h = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k_f \cdot m} \cdot \ln r + C. \quad (3.5)$$

Für die Bestimmung der Integrationskonstante  $C$  werden folgende Randbedingungen (siehe auch Abbildung 3.2) angesetzt:

$$\begin{aligned} h_1 &= H; r_1 = R \\ h_2 &= h_{BL}; r_2 = r_{BL} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Der Ausdruck für die Abnahme der Piezometerdruckhöhe entlang der radialen Koordinate  $r$  bei der Anströmung zum Brunnen lautet damit wie folgt:

$$H - h_{BL} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k_f \cdot m} \cdot (\ln R - \ln r_{BL}). \quad (3.7)$$

Mit dieser sogenannten Brunnenformel wird die Form des Absenkungstrichters bei gespannten Grundwasserverhältnissen bis zum Bohrlochradius  $r_{BL}$  unter der Voraussetzung beschrieben, dass das Strömungsgesetz von DARCY gültig ist.

Bei ungespannten Grundwasserverhältnissen ist die Grundwasserdruckhöhe gleich der Grundwasseroberfläche und der Bereich oberhalb der Grundwasseroberfläche ist ungesättigt. Für die ungespannten Verhältnisse ist als durchströmte Querschnittsfläche daher nur die wassergesättigte Höhe  $h(r)$  des Grundwasserleiters anzusetzen mit

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h(r). \quad (3.8)$$

Unter Berücksichtigung des DARCY-Gesetzes nach Gleichung (2.9) folgt die Kontinuitätsgleichung für ungespannte Grundwasserleiter mit (es gilt  $h = h(r)$ )

$$Q = k_f \cdot \frac{dh}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h. \quad (3.9)$$

Eine Trennung der Variablen führt zu

$$h \cdot dh = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k_f} \cdot \frac{1}{r} \cdot dr. \quad (3.10)$$

Durch Integration der Gleichung ergibt sich

$$\frac{1}{2} h^2 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k_f} \cdot \ln(r) + C. \quad (3.11)$$

Werden die Randbedingungen nach Abbildung 3.2 in die Gleichung (3.11) eingesetzt mit

$$\begin{aligned} h_1 &= H; r_1 = R \\ h_2 &= h_{BL}; r_2 = r_{BL} \end{aligned} \quad (3.12)$$

so erhält man die Gleichung der Spiegelfläche des Absenkungstrichters eines vollkommenen Brunnens bei ungespannten Verhältnissen:

$$H^2 - h_{BL}^2 = \frac{Q}{\pi \cdot k_f} \cdot (\ln R - \ln r_{BL}). \quad (3.13)$$

Bei der Ableitung dieser analytischen Lösung aus der Differentialgleichung der rotations-symmetrischen Brunnenanströmung (3.1) werden durch die DUPUIT-Annahmen nur horizontale Strömungskomponenten berücksichtigt. Nach DUPUIT (1863) basiert diese Vereinfachung auf der Beobachtung, dass im Aquifer in der Regel sehr geringe Gradienten ( $i \ll 1$  siehe BEAR, 1979) der Grundwasseroberfläche auftreten. Betrachtet man jedoch die Grundwasserströmung im Brunnennahbereich, so können dort starke Neigungen der Grundwasseroberfläche auftreten. Die Vereinfachung nach DUPUIT (1863) ist somit nur für gespannte Verhältnisse gültig, da in diesem Fall die steilen Gradienten in der Grundwasserdruckfläche auftreten und die Strömung trotzdem horizontal ist. Bei einer freien Grundwasseroberfläche werden vertikale Strömungskomponenten wirksam, welche zum Auftreten einer Sickerstrecke am Bohrloch führen (EHRENBERGER, 1928). Daher liegt der Absenkungstrichter in Abbildung 3.2 im Brunnennahbereich über der Oberfläche nach der DUPUIT-Gleichung (3.13). Das Phänomen der Sickerstrecke wird in Kapitel 3.4 erläutert.

Für die praktische Bemessung von Brunnen zur Aufnahme der Anströmung aus dem Grundwasserleiter ist die Beschränkung auf den linear laminaren Bereich nach DARCY in den meis-

ten Fällen ausreichend (BIESKE et al., 1998). Jedoch muss für die Untersuchung der Prozesse beim Eintritt des Grundwassers in den Brunnenausbau berücksichtigt werden, dass infolge des starken Gefälles im Brunnennahbereich die kritische Reynoldszahl von 1 (HLUSHKOU & TALLAREK, 2006) überschritten werden kann und die Strömungsgeschwindigkeit damit nicht mehr im linear laminaren DARCY-Bereich liegen muss. NAHRGANG (1965) zeigt anhand experimenteller Untersuchungen eine Veränderung der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Durchfluss, so dass bei höheren Fließgeschwindigkeiten die Brunnenformel (3.7) aufgrund der Ungültigkeit des DARCY-Gesetzes nicht mehr exakt ist. Es kommt zu einer Reduzierung der Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Filtergeschwindigkeit. Daher wird nachfolgend untersucht, wie bei der radialen Brunnenanströmung ein nichtlineares Widerstandsgesetz berücksichtigt werden kann.

### 3.3.2 Nichtlinear laminarer Regimebereich

Aufgrund des veränderten Widerstandsverhaltens ist bei nichtlinear laminaren Strömungsbedingungen das DARCY-Gesetz nicht mehr gültig und eine Lösung der LAPLACE-Gleichung wie in Kapitel 3.3.1 daher nicht möglich. Der Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und der Fließgeschwindigkeit muss durch Anwendung der Kontinuitätsbedingung zusammen mit einem nichtlinear laminaren Widerstandsgesetz für die horizontal-ebene Strömung zum Brunnen hergeleitet werden (SCHEIDEGGER, 1974). Aus der Kontinuitätsgleichung (3.4) für eine radiale Strömung im gespannten Grundwasserleiter kann die Fließgeschwindigkeit ermittelt werden zu

$$Q = v_r \cdot A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m \cdot v_r \Rightarrow v_r = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot m}. \quad (3.14)$$

Wird die Fließgeschwindigkeit aus der Kontinuitätsgleichung (3.14) in das Widerstandsgesetz nach der FORCHHEIMER-Gleichung (2.19) eingesetzt

$$i = \frac{dh}{dr} = a_F \cdot v_f + b_F \cdot v_f^2, \quad (3.15)$$

ergibt sich

$$\frac{dh}{dr} = a_F \cdot \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot m} + b_F \cdot \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot m} \right)^2. \quad (3.16)$$

Eine Trennung der Variablen führt zu

$$dh = \left( \frac{a_F \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot \frac{1}{r} + b_F \cdot \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \right)^2 \cdot \frac{1}{r^2} \right) \cdot dr \quad (3.17)$$

und nach Integration über den Radius folgt

$$h = \frac{a_F \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot \ln r + b_F \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \right)^2 \cdot \left( -\frac{1}{r} \right) + C. \quad (3.18)$$

Die Integrationskonstante  $C$  wird durch Einsetzen der äußeren Randbedingung  $h_1 = H; r_1 = R$  bestimmt. Damit lautet die Gleichung für den Druckverlust der Brunnenanströmung für nichtlinear laminare Verhältnisse im gespannten Aquifer wie folgt:

$$H - h = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \left[ \underbrace{a_F \cdot \ln \left( \frac{R}{r} \right)}_{\text{linearer Anteil}} - \underbrace{\frac{b_F \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)}_{\text{nichtlinearer Anteil}} \right]. \quad (3.19)$$

Der zweite Term in der Klammer auf der rechten Seite berücksichtigt die zusätzlichen Verluste infolge eines nichtlinearen Widerstandsverhaltens beim Anwachsen der Trägheitskräfte (ENGELUND, 1953; BARKER & HERBERT, 1992; EWING et al., 1999). Im Unterschied dazu stellt der erste Term mit  $a_F = 1/k_f$  die Brunnenformel für linear laminare Verhältnisse dar.

Diese einfache analytische Lösung der Differentialgleichung ist für ungespannte Verhältnisse nicht ableitbar, da die radiale Fließgeschwindigkeit von der Höhe des gesättigten Grundwasserkörpers abhängt. Daher muss die Höhe  $h$  auf beiden Seiten der Gleichung (3.20) berücksichtigt werden und eine Variablentrennung ist nicht durchführbar.

$$\frac{\Delta h}{\Delta r} = a_F \cdot \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} + b_F \cdot \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} \right)^2 \quad (3.20)$$

### 3.3.3 Turbulenter Regimebereich

Für sehr große Reynoldszahlen im vollturbulenten Bereich dominiert nach SCHEIDEGGER (1974) der zweite Term in Gleichung (3.19), so dass sich die Gleichung nach der Lösung von ENGELUND (1953) für den Fall der symmetrischen radialen Strömung zum Brunnen reduzieren lässt auf

$$h = \beta \cdot \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \right)^2 \cdot \frac{1}{r} + C. \quad (3.21)$$

Nach Einsetzen der äußeren Randbedingung  $h_1 = H; r_1 = R$  ergibt sich die folgende Gleichung für den Druckverlust bei turbulenter Brunnenanströmung:

$$H - h = \beta \cdot \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right). \quad (3.22)$$

Hierbei wird mit dem Koeffizienten  $\beta$  der gesamte Einfluss des durchströmten porösen Mediums abgebildet.

### 3.4 Strömungsverhältnisse im Schüttmaterial

Als zweiter Bereich wird nach Abbildung 3.1 bei der Brunnenanströmung das Schüttmaterial durchströmt. Dieses ist ein poröses Material, welches aus definierten Korngruppen zusammengesetzt ist und zum Verfüllen des Ringraums beim Brunnenbau eingebracht wird. Die Dicke der durchströmten Schüttmaterialschicht ist daher im Vergleich zum Grundwasserleiter sehr gering. Trotzdem können zunächst die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei der Brunnenanströmung aus dem Grundwasserleiter zugrunde gelegt werden (BARKER & HERBERT, 1992). Lediglich die Kenngrößen des porösen Materials unterscheiden sich aufgrund der größeren Körner und der sich beim Schütten einstellenden Packungsstruktur. Als Kornform wird nach DIN 4924 (1998) ein möglichst rundes Korn gefordert. Dies hat zur Anwendung von Glaskugeln als Schüttmaterial im heutigen Brunnenbau geführt (HERRMANN, 2008). Alternativ wird sehr häufig Filterkies mit festgelegten Korngruppen nach DIN 4924 (1998) als Schüttmaterial eingesetzt.

Die Aufgabe einer Schüttmaterialschicht besteht einerseits in dem Zurückhalten des Grobkornanteils des anstehenden Grundwasserleiters während des Dauerbetriebs. Andererseits soll der Feinkornanteil des anstehenden Bodens beim Entsanden des Brunnens nach seiner Inbetriebnahme hindurchgelassen werden, damit die Durchlässigkeit am Bohrloch erhöht wird (BALKE et al., 2000). Die Korngrößenverteilung des Schüttmaterials muss daher auf die Kornverteilung des Grundwasserleiters angepasst werden. Durch den Einbau einer Schüttmaterialschicht wird die Durchlässigkeit direkt am Filterrohr erhöht und die Gesamtabenkung nur geringfügig reduziert (vgl. Abbildung 3.3). Je größer das Schüttmaterial gewählt wird, desto durchlässiger ist es und verursacht dadurch einen geringeren Strömungswiderstand. Auch kann durch die Auswahl des Schüttmaterials der häufig auftretende Skineffekt an der Bohrlochwand (vgl. Kapitel 3.6.2) verringert und somit die Leistungsfähigkeit des Brunnens erhöht werden.

Unter der Annahme, dass sich die Strömung im Schüttmaterial im linear laminaren Regimebereich befindet, wird der Druckverlust beim Durchströmen der Schüttmaterialschicht für gespannte Verhältnisse zwischen den begrenzenden Radien  $r_{SM}$  und  $r_{FR}$  (siehe Abbildung 3.3) auf der Grundlage des DARCY-Gesetzes und der Brunnenformel (3.7) bestimmt mit

$$h_{SM} - h_{FR} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k_{f,SM} \cdot L_{SM}} \cdot \ln \frac{r_{SM}}{r_{FR}}, \quad (3.23)$$

wobei der Verlustanteil nur auf die eingebaute Schüttmaterialmächtigkeit  $L_{SM}$  bezogen wird. Statt der Aquifermächtigkeit  $m$  und der Aquiferdurchlässigkeit  $k_f$  werden daher die Mächtigkeit der Schüttmaterialschicht  $L_{SM}$  und die Schüttmaterialdurchlässigkeit  $k_{f,SM}$  angesetzt.

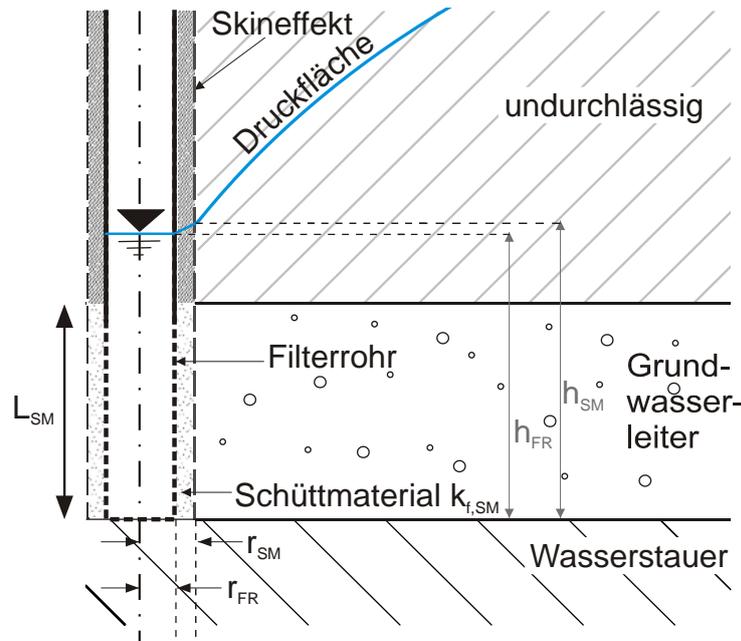


Abbildung 3.3: Zufluss zum Brunnen im Nahbereich mit Eintritt in die Schüttmaterialschicht für gespannte Verhältnisse

Da die Zufluss zum Brunnen in direkter Brunnennähe und auch im Brunnenausbau durch die radiale Anströmung zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten führen kann, ist die Annahme eines linear laminaren Strömungsregimes nicht immer zutreffend (vgl. Kapitel 2.3.2). Die zusätzlichen Verluste, welche aus der zum Teil turbulenten Strömung entstehen, können wie bei der Brunnenanströmung aus dem Grundwasserleiter nach ENGELUND (1953) durch die Anwendung der FORCHHEIMER-Gleichung (2.19) auf die stationäre Brunnenanströmung und Integration zwischen den begrenzenden Radien  $r_{SM}$  und  $r_{FR}$  durch den zweiten Term der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$h_{SM} - h_{FR} = \frac{a_F \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot L_{SM}} \cdot \ln \frac{r_{SM}}{r_{FR}} + b_F \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L_{SM}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_{FR}} - \frac{1}{r_{SM}} \right). \quad (3.24)$$

Wird die Brunnenanströmung in einem Aquifer mit freier Oberfläche betrachtet, muss für den Druckverlust beim Durchströmen der Schüttmaterialschicht die Gleichung (3.13) für das

DARCY-Regime mit den Randbedingungen der Schüttmaterialschicht aus Abbildung 3.4 angewendet werden.

$$h_{SM}^2 - h_{FR}^2 = \frac{Q}{\pi \cdot k_{f,SM}} \cdot \ln \frac{r_{SM}}{r_{FR}} \quad (3.25)$$

Eine Berücksichtigung zusätzlicher nichtlinearer Verluste für ungespannte Verhältnisse ist aufgrund der Komplexität der radialen Strömungsgleichung nicht möglich. Häufig werden daher in der Praxis nicht die Einzelverluste unterschieden, sondern diese über einen Gesamteintrittsverlust erfasst (LANGGUTH & VOIGT, 2004).

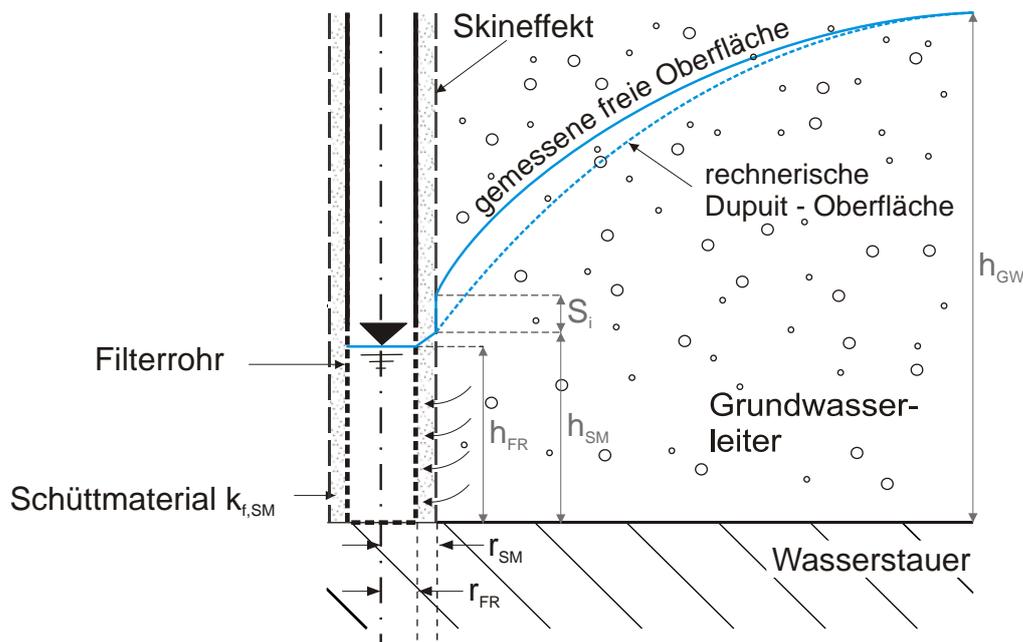


Abbildung 3.4: Zufluss zum Brunnen im Nahbereich mit Eintritt in die Schüttmaterialschicht für ungespannte Verhältnisse

Beobachtungen an Brunnen in Aquiferen mit freier Oberfläche zeigen, dass der Wasserspiegel im Brunnen immer unterhalb des Wasserstands im direkt angrenzenden Grundwasserleiter liegt und eine Sickerstrecke auftritt. Die Sickerstrecke wird häufig zusammen mit weiteren Verlusten als Gesamteintrittsverlust behandelt, sie kann aber auch einzeln ermittelt werden, wie im Folgenden kurz dargestellt wird.

Die analytische Erklärung der Sickerstrecke beruht auf der Tatsache, dass die DUPUIT-Annahmen (vgl. Kapitel 3.3.1) im Brunnennahbereich nicht mehr zutreffen, da die Vertikal-komponente der Grundwasserströmung nicht mehr vernachlässigt werden kann. Bei gegebener Brunnenförderrate ist folglich ein größerer Strömungsquerschnitt erforderlich (LANGGUTH & VOIGT, 2004), was zum Auftreten der Sickerstrecke führt. LANGGUTH & VOIGT (2004) führen aus, dass die bisherige Annahme des Auftretens einer Sickerstrecke am Bohrlochrand

(siehe Abbildung 3.4) für einen Vertikalfilterbrunnen mit umgebenden Kiesfilter nicht exakt aber als Konzept ausreichend ist, da mathematisch betrachtet die Sickerstrecke eine Diskontinuität zwischen einem porösen Medium und einer freien Wasseroberfläche, dem Brunnenwasserspiegel, darstellt. Nach NAHRGANG (1965) und EHRENBERGER (1928) kann die Sickerstrecke  $S_i$  mit folgender Beziehung ermittelt werden:

$$S_i = \frac{1}{2} \frac{(h_{GW} - h_{SM})^2}{h_{GW}}. \quad (3.26)$$

Der Kapillarraum muss nach NAHRGANG (1965) und WYCKOFF et al. (1932) bei der experimentellen Untersuchung der Sickerstrecke berücksichtigt werden, da der Verlauf der freien Oberfläche bei Labormodellen aufgrund der geringen Mächtigkeit signifikant durch die kapillare Steighöhe beeinflusst wird.

### 3.5 Strömungsverhältnisse im Filterrohr

Nach dem Durchströmen des Schüttmaterials tritt das Grundwasser durch das Filterrohr in den Brunneninnenraum ein und wird aus diesem Sammelraum durch Pumpen zutage gefördert. Da eine Bohrung im Lockergestein nicht von alleine standfest ist, muss das Bohrloch durch das Brunnenfilterrohr abgestützt werden. Dabei dient die eingebrachte Filterkiesschicht im Ringraum als zusätzlicher Stützkörper. Brunnenfilterrohre sind Rohre mit horizontalen oder vertikalen Öffnungen im Filtermantel. Die Anforderungen an Brunnenfilterrohre als Wassereintrittsorgan betreffen eine sandfreie Förderung des Grundwassers durch einen Rückhalt feiner Sedimentpartikel bis auf einen akzeptablen Restsandgehalt bei einem möglichst geringen hydraulischen Widerstand.

Jedes Filterrohr setzt dem einströmenden Wasser aus dem Grundwasserleiter einen Widerstand aufgrund der begrenzten offenen Filterfläche entgegen. Dieser Widerstand führt zu einem Energieverlust, welcher sich durch eine Abnahme der Druckhöhe von außen nach innen zeigt. Ähnlich wie beim porösen Medium existieren auch für die durchströmten Filterrohröffnungen unterschiedliche Modellvorstellungen (siehe Abbildung 3.5). Auf der linken Seite in Abbildung 3.5 wird der Filterrohrmantel als homogenes poröses Material angenommen, während auf der rechten Seite eine Aufsummierung der Einzelverluste eines durchströmten Schlitzes vorgenommen wird. Somit wird entweder das Filterrohr als poröses Medium mit einer konstanten Durchlässigkeit angesehen oder die einzelnen Öffnungen werden durch Lochblenden mit Einzelverlustbeiwerten abstrahiert. Wenn das Filterrohr als poröses Medium aufgefasst wird, können die Filterrohröffnungen als relativ kurze Röhren mit einem definierten Querschnitt dargestellt werden. Diese Modellvorstellung entspricht dem Kapillarmodell für

die Durchströmung poröser Medien (vgl. Kapitel 2.2.1). Nachfolgend werden Untersuchungen zu den beiden Modellvorstellungen aufgezeigt.

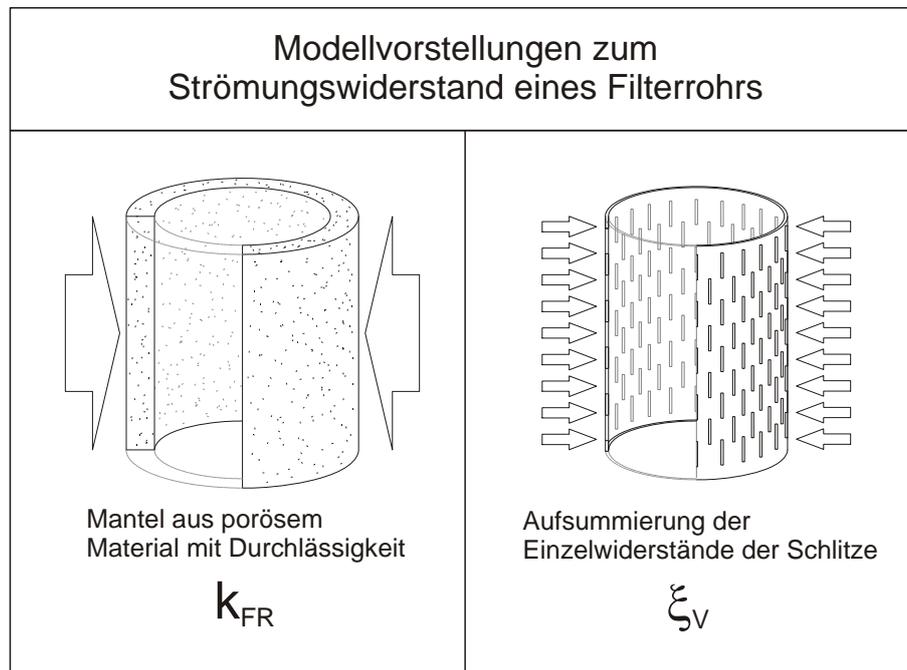


Abbildung 3.5: Modellvorstellungen zum Strömungswiderstand eines Filterrohres bei Durchströmung

### 3.5.1 Filterrohr als poröses Medium

SINGH & SHAKYA (1989) nehmen an, dass die Filterrohre bei ihrer Untersuchung wie ein poröses Medium betrachtet werden können und somit auch eine bestimmbare Durchlässigkeit  $k_{FR}$  besitzen. Daher führen sie Untersuchungen in einem zylindrischen Versuchstank mit Sandfüllung durch, wobei sie den Druckverlust  $\Delta h_{FR}$  in Abhängigkeit vom Durchfluss  $Q$  für gespannte Verhältnisse bestimmen. Für die Auswertung der Versuchsergebnisse treffen SINGH & SHAKYA (1989) die Annahme, dass das Filterrohr mit Innenradius  $r_{Br}$  als Rand des Strömungsfeldes mit einer Durchlässigkeit aufgefasst (vgl. Abbildung 3.6) und ein verallgemeinertes nichtlineares Fließgesetz nach AHMED & SUNADA (1969) werden kann. Damit stellen sie die folgende Gleichung auf, welche den Druckverlust abhängig von der Filterrohrgeometrie und dem Durchfluss darstellt:

$$\Delta h_{FR} = h_{FR} - h_{Br} = \frac{b_{FR}}{(2\pi \cdot r_{Br} \cdot k_{FR} \cdot m)^s} Q^s. \quad (3.27)$$

Der Exponent  $s$  wird durch eine Regressionsanalyse basierend auf den Messdaten bestimmt zu  $s = 1.911$ , um damit die Durchlässigkeit  $k_{FR}$  zu bestimmen (siehe Tabelle 3.1). Die Gleichung (3.27) entspricht für  $s = 2$  der Gleichung (3.22) für den turbulenten Regimebereich.

Die Untersuchungen von SINGH & SHAKYA (1989) führen zur Ableitung einer nichtlinearen Gleichung für das Einströmen von Wasser in das Filterrohr mit einer Wandstärke  $b_{FR}$ .

$$v = k_{FR} \cdot \left( \frac{\Delta h_{FR}}{b_{FR}} \right)^{1/1.911} \quad (3.28)$$

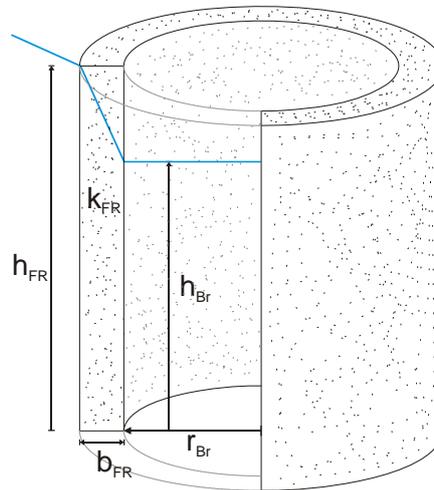


Abbildung 3.6: Vertikaler Schnitt durch die Filterrohrwand zur Berechnung der Filterrohrdurchlässigkeit  $k_{FR}$  als poröses Medium

Als Begründung für die annähernd quadratische Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Eintrittsgeschwindigkeit wird ausgeführt, dass die Filterrohröffnungen mit zunehmender Betriebsdauer durch Aquifermaterial aus dem Grundwasserleiter verstopft werden. Dadurch reduziert sich die Eintrittsfläche und die Fließgeschwindigkeit muss aufgrund der Kontinuität zunehmen. Es kommt daher nach SINGH & SHAKYA (1989) zwangsläufig zur Abweichung vom linear laminaren Regimebereich am Filterrohr.

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen für geschlitzte Stahlfilterrohre (Durchmesser 115.4 mm, Rohrlänge 1 m) und verschiedenen freien Filterflächen nach SINGH & SHAKYA (1989)

Freie Filterfläche [%]	$k_{FR}$ [m/s]
1.70	$1.59 \cdot 10^{-4}$
2.55	$4.10 \cdot 10^{-4}$
5.16	$1.06 \cdot 10^{-3}$
10.32	$3.44 \cdot 10^{-3}$
12.90	$4.27 \cdot 10^{-3}$
17.21	$4.44 \cdot 10^{-3}$
20.65	$5.01 \cdot 10^{-3}$
27.53	$5.29 \cdot 10^{-3}$

Auch die Arbeitsgruppe um KLOTZ hat die hydrodynamischen Vorgänge an Filterrohren durch Visualisierung und Messung der horizontalen Grundwasserströmung mittels Tracern untersucht (KOCH et al., 1967; DROST et al., 1968; KLOTZ, 1969; BERGMANN, 1970; KLOTZ, 1971). Dabei wird die Abhängigkeit der Stromlinienablenkung auf der horizontalen Ebene von den hydraulischen Widerständen und Radien des Bohrlochausbaus untersucht. Es wird eine Verzerrung des Grundwasserströmungsfeldes, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, beim unbeanspruchten Modellbrunnen beobachtet.

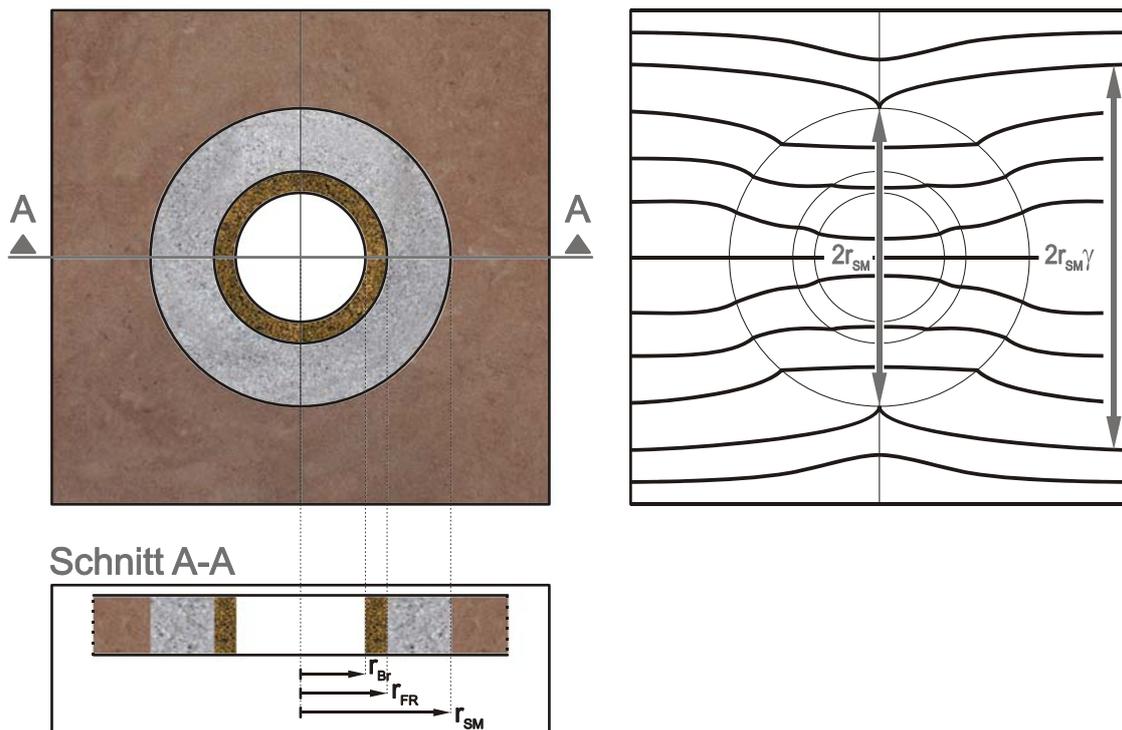


Abbildung 3.7: Horizontale Durchströmung eines Bohrlochs mit Filterrohr und Schüttmaterial im homogenen Grundwasserleiter mit der Darstellung der Stromlinienverzerrung und des vertikalen Schnitts durch das Bohrloch, verändert nach KOCH et al. (1967)

Diese Verzerrung wird durch eine Tracerverdünnung als Farbindikatorwolke im Plexiglasmodell durch einen Detektor im Filterrohr gemessen, wobei die Tracerkonzentration bei Beginn der Messung  $c_{T0}$  beträgt und zum Zeitpunkt  $t$  sich auf  $c_T$  verdünnt hat. Das Feldverzerrungsverhältnis  $\gamma$ , welches den Einfluss der Einschnürung bei einer horizontalen Durchströmung des Filterrohrs darstellt, wird mit der folgenden Gleichung in Bezug zur Fließgeschwindigkeit gesetzt:

$$v_f = - \frac{\pi \cdot (r_{Br}^2 - r_{Detektor}^2)}{2 \cdot \gamma \cdot r_{Br} \cdot t} \cdot \frac{c_T}{c_{T0}} \quad (3.29)$$

Dieses Feldverzerrungsverhältnis wird nach KOCH et al. (1967) potentialtheoretisch abgeleitet, so dass für ein Bohrloch mit Schüttmaterial und homogenem Grundwasserleiter der folgende Zusammenhang besteht:

$$\gamma = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_{Br}}{r_{FR}}\right)^2 + \frac{k_{f,SM}}{k_{FR}} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_{Br}}{r_{FR}}\right)^2\right]} \quad (3.30)$$

Mit dem vorgestellten Verdünnungsverfahren werden bei KOCH et al. (1967) und KLOTZ (1969) Strömungsversuche an einem zweidimensionalen Modell durchgeführt und die Fließgeschwindigkeit sowie das Feldverzerrungsverhältnis bestimmt. Die Durchlässigkeit  $k_{FR}$  der Filterrohrwand lässt sich anhand der Versuchsergebnisse (siehe Tabelle 3.2) als poröses Medium beschreiben, welches dem DARCY-Gesetz folgt, solange die Fließgeschwindigkeit im linear laminaren Bereich bleibt. KLOTZ (1969) zeigt anhand von Laborversuchen, dass die Filterrohrdurchlässigkeit nur eine Funktion der offenen Filterfläche und der Schlitzgeometrie ist.

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen für geschlitzte Stahlfilterrohre mit unterschiedlichen Durchmessern und verschiedenen offenen Filterflächen nach KLOTZ (1969)

Freie Filterfläche [%]	Durchmesser [mm]	$k_{FR}$ [m/s]
5.3	30	$6.3 \cdot 10^{-3}$
3.1	50	$3.2 \cdot 10^{-3}$
2.6	60	$2.4 \cdot 10^{-3}$
2.0	80	$1.7 \cdot 10^{-3}$
1.6	100	$9.0 \cdot 10^{-4}$
1.3	125	$7.0 \cdot 10^{-4}$
0.8	200	$2.0 \cdot 10^{-4}$

### 3.5.2 Filterrohröffnungen als Lochblende

Der Druckverlust beim Wassereintritt durch die Filterrohröffnungen wird auch häufig wie ein örtlicher hydraulischer Rohrströmungsverlust, hervorgerufen durch eine Lochblende, behandelt. Nach WILLIAMS (1981) wird ein Druckverlust  $\Delta h_{FR}$  verursacht mit

$$\Delta h_{FR} = \left( \frac{1}{c_v^2} - 1 \right) \cdot \frac{v_{f,krit}^2}{2g}, \quad (3.31)$$

wobei  $c_v$  einen Geschwindigkeitskoeffizienten und  $v_{f,krit}$  die maximale Eintrittsgeschwindigkeit in das Filterrohr darstellt. PETERSEN et al. (1955) wenden auch den Lochblendenverlustansatz zur Analyse der Strömung durch die Filterschlitz an. GARG & LAL (1971) kombinie-

ren diesen Ansatz mit einer differentiellen Rohrströmungsgleichung zur numerischen Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung im Bohrloch. Dieser Ansatz wird von COOLEY & CUNNINGHAM (1979) um die instationäre Strömung zum Brunnen unter Berücksichtigung der Energieverluste um und im Bohrloch erweitert.

PETERSEN et al. (1955) untersuchen das Verhältnis des Druckverlustes  $\Delta h_{FR}$  zur kinetischen Energiehöhe  $v_f^2/2g$  anhand umfangreicher Versuche mit Filterrohren in einem Wassertank mit umgebendem Schüttmaterial. Dabei wird eine Pumpe in das Filterrohr gehängt und dadurch eine Strömung in das Filterrohr generiert. Die Strömung gliedert sich in eine horizontale Strömung durch die Filteröffnungen in das Rohr und eine vertikale Strömung im Rohr zur Pumpe hin. Es kommt zu einer Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie beim Durchtritt durch die Filterschlitz. Dadurch werden die einzelnen Wasserstrahlen in den Filterschlitz beschleunigt. Im Filterrohr selbst wird die Strömung sofort wieder abgebremst. Dies führt zu einem Druckverlust und damit zu einem geringeren Wasserstand im Filterrohr gegenüber dem Außenwasserstand am Filterrohr. Durch den Betrieb der Pumpe wird das Wasser im Filterrohr dann wieder beschleunigt. Mit Hilfe der Dimensionsanalyse ermitteln PETERSEN et al. (1955) einen funktionalen Zusammenhang zwischen den wesentlichen Bemessungsparametern eines Filterrohrs und dem Druckverlust im Verhältnis zur kinetischen Energiehöhe

$$\frac{\Delta h_{FR}}{v_f^2 / 2g} = f\left(C_c, A_p, \frac{L_{FR}}{D_{FR}}\right) \quad (3.32)$$

mit dem Einschnürungskoeffizienten der Filteröffnungen  $C_c$ , der offenen Filterrohrdurchtrittsfläche  $A_p$  und dem Größenverhältnis Filterrohrlänge  $L_{FR}$  zum Filterrohrdurchmesser  $D_{FR}$ .

Für die weitere theoretische Ableitung nehmen PETERSEN et al. (1955) an, dass keine Beschleunigung senkrecht zur Fließrichtung und keine Änderung der Fließgeschwindigkeit innerhalb der betrachteten Rohrquerschnitte auftritt. Auch Strömungswiderstände werden vernachlässigt. Damit ermitteln PETERSEN et al. (1955) einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Filterwiderstandskoeffizienten  $\frac{\Delta h_{FR}}{v_f^2 / 2g}$  und den Filterrohrparametern  $C_p$ ,  $L_{FR}$  und  $D_{FR}$  der folgenden Form

$$\frac{\Delta h_{FR}}{v_f^2 / 2g} = \frac{\cosh(C_p L_{FR} / D_{FR}) + 1}{\cosh(C_p L_{FR} / D_{FR}) - 1} \quad (3.33)$$

mit  $C_p = 11.31 \cdot C_c \cdot A_p$ . Die Ergebnisse in Abbildung 3.8 von PETERSEN et al. (1955) zeigen, dass ein kritischer Wert für die hyperbolische Funktion  $\cosh(C_p L_{FR} / D_{FR})$  existiert, ab welcher der Filterwiderstandskoeffizient ein Minimum von 1 erreicht. Das heißt, die Filterrohrlänge und der Durchmesser bestimmen die prozentual offene Fläche, bei welcher die Ver-

lusthöhe minimal wird. Allerdings reduziert sich mit abnehmender Filterlänge auch die Filterfläche und die Verlusthöhe wächst damit wieder.

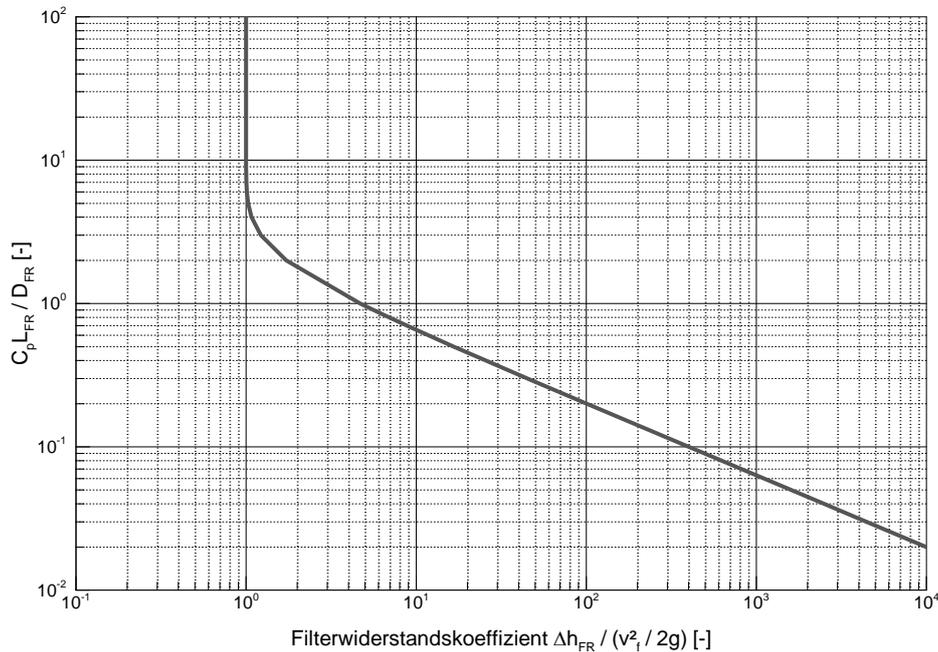


Abbildung 3.8: Filterwiderstandskoeffizient als Funktion von Filterrohrparametern  $C_p$ ,  $L_{FR}$  und  $D_{FR}$  nach PETERSEN et al. (1955)

Der Zusammenhang nach Gleichung (3.33) wurde nur für Filterrohre im Wassertank mit Schüttmaterial abgeleitet und nicht für Brunnenbauwerke mit Schüttmaterial und Aquifermaterial überprüft. Daher ist nach GARG & LAL (1971) die Anwendbarkeit der Gleichung als eingeschränkt zu betrachten, so dass GARG & LAL (1971) weitere Versuche mit einem zylindrischen Modell gefüllt mit Aquifermaterial, Schüttmaterial und Filterrohr durchführen. Im Vergleich zu den theoretisch berechneten Werten für den Druckverlust über dem Durchfluss sind die gemessenen Werte bei GARG & LAL (1971) für den Druckverlust größer. Dies wird einerseits auf kolmatisierte Partikel am Filterrohr und andererseits auf eine Abweichung vom linear laminaren DARCY-Regime direkt am Filterrohr zurückgeführt. Außerdem wird für den Filterwiderstandskoeffizienten der Grenzwert nach PETERSEN et al. (1955) um den Faktor 10 erhöht und für die offene Filterrohrfläche eine untere Grenze von 10 % empfohlen.

Weitere Druckverlustmessungen im Filterrohr werden von CLARK & TURNER (1983) im Laborversuch an einem Brunnensegment ohne Schütt- und Aquifermaterial durchgeführt. Es werden verschiedene Filterrohre auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht und durch die Auftragung des gemessenen Druckverlustes über dem Quadrat der Eintrittsgeschwindigkeit eine Bewertung der hydraulischen Effizienz vorgenommen. Die hydraulische Effizienz der untersuchten Filterrohre ist abhängig von der Geometrie der Öffnungen im Filterrohr. Allerdings

werden die Druckverluste bei naturnahen Eintrittsgeschwindigkeiten mit  $\Delta h_{FR} < 5$  mm angegeben und daher als vernachlässigbar für die praktische Anwendung angesehen.

Somit wird aus den Ergebnissen der beschriebenen Untersuchungen deutlich, dass die Strombahnen beim Eindringen durch die Verteilung der Öffnungen auf dem Filterrohrmantel und die Geometrie der Filterrohröffnungen beeinflusst werden.

### 3.5.3 Strömungsbeeinflussung durch die Filterrohröffnungen

Es existieren folgende Arten der Filterrohröffnungen:

- Schlitzlochung (horizontal und vertikal)
- Schlitzbrückenlochung (Material des Schlitzes wird nicht vollständig herausgestanzt, sondern bleibt als Brücke über dem Schlitz stehen)
- sich konisch erweiternde Öffnung (Wickeldrahttechnik)
- Kreisrunde Öffnung im Vollwandrohr

Die Anzahl, Größe und Verteilung der Filterrohröffnungen auf der Mantelfläche bestimmt die freie Eintrittsfläche, durch welche das Wasser in den Brunneninnenraum einströmen kann. Bei der Wickeldrahttechnik entsteht zum Beispiel eine umlaufende Öffnung geringer Spaltweite. Im Vergleich zur kreisrunden Öffnung im Vollwandrohr werden die Stromlinien jedoch nicht so stark durch die Öffnung abgelenkt, wie die Abbildung 3.9 zeigt.

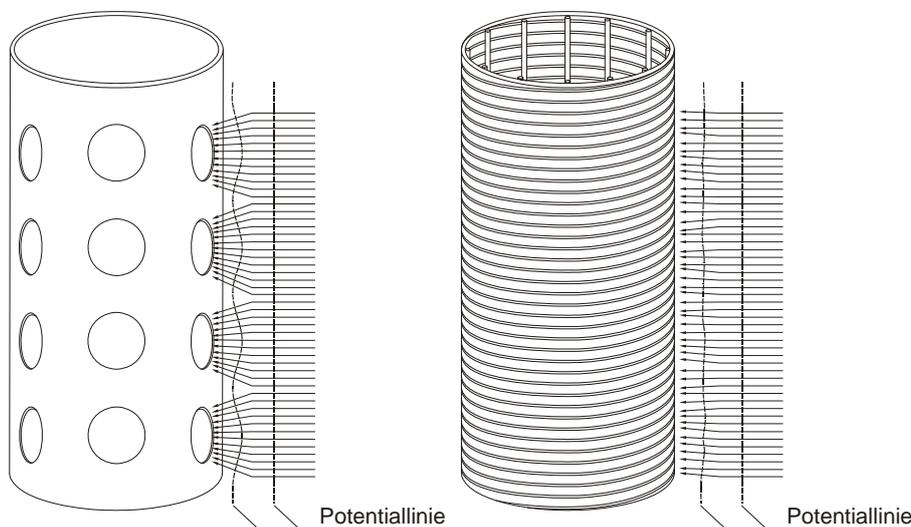


Abbildung 3.9: Vergleich zwischen einem kreisgelochten (rechts) und einem gewickelten (links) Filterrohr mit der Darstellung der Stromlinienbeeinflussung durch die Filterrohröffnungen

In Abhängigkeit von der Geometrie der Öffnungen eines Filterrohres werden die Stromlinien beim Durchströmen abgelenkt (siehe Abbildung 3.10). Nach TRESKATIS et al. (1998) ist ein sich nach innen öffnendes V-Profil des Spaltes (Keilform) hydraulisch günstig, weil es nicht zu einem Abriss der Strömung und damit zur Bildung von Strömungswalzen und Turbulenzen

an der Filterrohrinnenseite kommen kann. Im Gegensatz dazu zeigen CLARK & TURNER (1983), dass eine Schlitzbrückenlochung hydraulisch am besten im Vergleich zur Wickeldrahttechnik und zur Schlitzlochung bei einer Schlitzweite von je 1 mm ist.

Die Schlitzbrückenlochung soll durch die Brücke, welche den Schlitz schützt, ein Eindringen der Sandkörner in den Brunnen verhindern. Bis auf die konische Spaltgeometrie der Wickeldrahtfilter kann es bei allen anderen Schlitzarten zu einem Abriss der Strömung kommen.

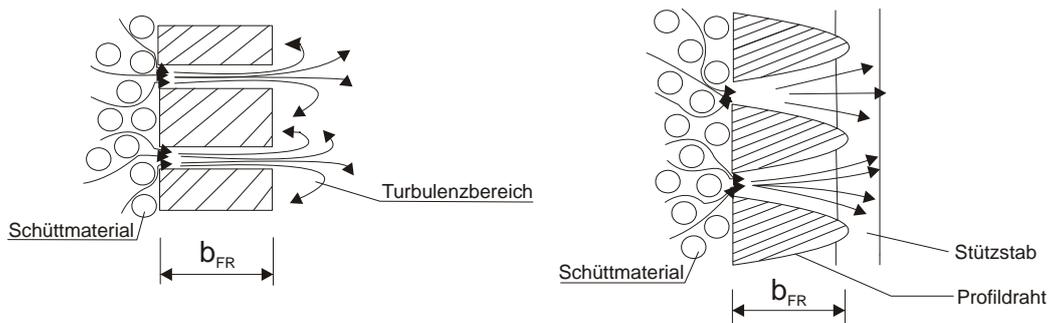


Abbildung 3.10: Schematische Beeinflussung der Strömungsbahnen durch die Spaltgeometrie, rechts für ein Filterrohr mit horizontaler Schlitzlochung und links für ein Filterrohr in Wickeldrahttechnik, verändert nach TRESKATIS et al. (1998)

### 3.6 Berücksichtigung der Trennflächenwiderstände

Eine Trennfläche definiert in der Grundwasserströmung die Grenze zwischen zwei Strömungsfeldern mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten. Bei der Anströmung eines Brunnens entstehen durch den Brunnenausbau mit Filterrohr und Schüttmaterial im Ringraum zwei Trennflächen, an denen die Durchlässigkeit örtlich sprunghaft ansteigt:

- Trennfläche zwischen poröser Aquifermatrix und Schüttmaterial
- Trennfläche zwischen Schüttmaterial und Filterrohr

Aufgrund der gegebenen Geometrie der Einzelkomponenten besitzen die Flächen eine Ringzylinderform. Nach BUSCH et al. (1993) ist an diesen Trennflächen das Brechungsgesetz der Potentialtheorie gültig. Die un stetige Änderung der Durchlässigkeit verursacht einen un stetigen Verlauf der Strom- und Potentiallinien. Wenn auf beiden Seiten der Trennfläche das Gesetz nach DARCY angenommen wird, so verhalten sich die Tangenten der beiden Brechungswinkel zwischen den Stromlinien und der Trennflächennormalen wie die Durchlässigkeitsbeiwerte der beiden Strömungsfelder:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{k_{f,1}}{k_{f,2}} \quad (3.34)$$

Die Stromlinie wird an der Trennfläche ähnlich wie Lichtstrahlen gebrochen, wie beispielhaft in Abbildung 3.11 dargestellt (BUSCH et al., 1993). Beim Fall der Trennfläche zwischen Grundwasserleiter und Ringraumfüllung nimmt die Durchlässigkeit in Strömungsrichtung zu.

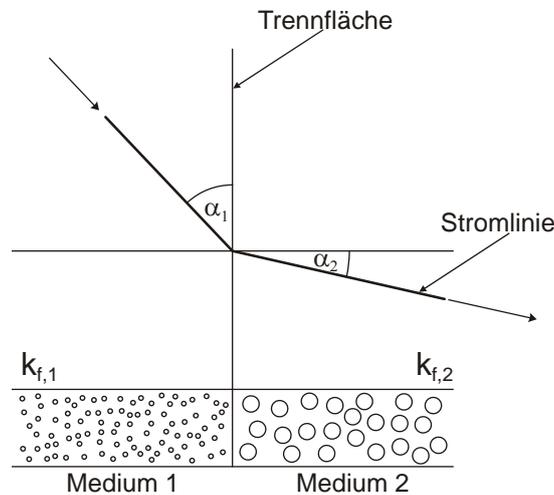


Abbildung 3.11: Sprunghafter Wechsel der Durchlässigkeit an einer Trennfläche mit Darstellung der Stromlinie

Für die zweite Trennfläche zwischen dem Schüttmaterial und dem Filterrohr gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie für die erste Trennfläche. Neben dem Wechsel der Durchlässigkeit bei der Strömung zum Brunneninnenraum können auch weitere Phänomene die Trennflächenwiderstände beeinflussen. Generell können durch den Strömungsvorgang Bodenpartikel transportiert werden, welche dann an unterschiedlichen Stellen wieder abgelagert werden. Dieser Vorgang der hydromechanischen Bodendeformation wird im folgenden Kapitel 3.6.1 analysiert. Des Weiteren werden Brunneneintrittsverluste, welche zur zusätzlichen Absenkung des Brunnenwasserstands aufgrund verschiedener Ursachen führen, mit dem Begriff Skineffekt zusammengefasst und in Kapitel 3.6.2 vorgestellt. Auf die Modellversuche am Brunnengesamtsystem zur Berücksichtigung von verschiedenen Phänomenen der Trennflächen wird in Kapitel 3.6.3 gesondert eingegangen.

### 3.6.1 Hydromechanische Bodendeformation

Die hydromechanische Verformung von nichtbindigen Lockergesteinen umfasst auf der Porenebene die Prozesse der Suffosion, Erosion und Kolmation, welche im Folgenden kurz erläutert werden. Eine Darstellung der drei Prozesse für horizontale Strömungen zu zwei Zeitpunkten zeigt Abbildung 3.12, wobei die Pfeile unter den einzelnen Teilbildern die Hauptströmungsrichtung anzeigen.

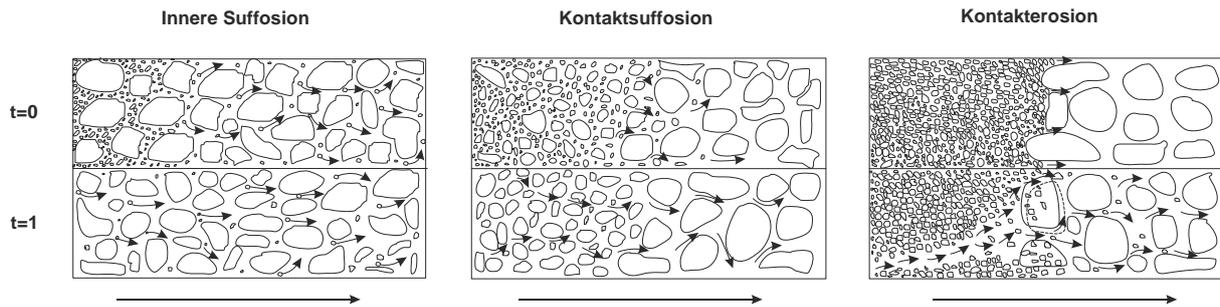


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der inneren Suffosion, Kontaktsuffosion und Kontakterosion für horizontale Strömungsprozesse, verändert nach ZIEMS (1969)

Der Begriff Suffosion bezeichnet die Umlagerung und den Transport von Teilchen der feineren Fraktion eines ungleichförmigen nichtbindigen porösen Mediums ( $d_{10} > 0.002$  mm) im Porenraum der Feststoffmatrix infolge der Strömung (ZIEMS, 1967). Das Skelett des porösen Mediums wird dadurch nicht verändert oder zerstört, aber die Raumdichte nimmt ab, während die Durchlässigkeit und die Porosität zunehmen. Als suffosionsgefährdet werden poröse Medien mit einer relativ großen Ungleichförmigkeit  $U = d_{60} / d_{10} > 8$  bezeichnet, wobei zwischen einer inneren Suffosion und einer Kontaktsuffosion differenziert wird (vgl. Abbildung 3.12). Die zeitliche Dauer der inneren Suffosion ist aufgrund der begrenzten Transportwege der bewegten Teile beschränkt, wenn die innere Suffosion nicht durch eine Kontaktsuffosion eingeleitet oder aufrechterhalten wird. Diese Kontaktsuffosion bezeichnet die Bewegung von feinen Partikeln aus den Poren eines porösen Mediums in die Poren des angrenzenden größeren porösen Mediums, in welchem der Prozess dann meist als innere Suffosion fort dauert. Anhand der Lage des feineren porösen Mediums zum größeren und der vorliegenden Strömungsrichtung werden nach ZIEMS (1969) verschiedene Typen der Kontaktsuffosion unterschieden. Für die Anströmung eines Brunnens kommt nur der Typ mit horizontaler Strömung und vertikaler Schichtung des porösen Mediums in Frage.

Mit Erosion wird die Umlagerung und der Transport fast aller Fraktionen eines porösen Mediums bezeichnet, was zu einer fortschreitenden Zerstörung führt. Bedeutend für die Brunnenanströmung sind die innere Erosion und die Kontakterosion. Fehlstellen im Lockergestein oder eng begrenzte geologische Besonderheiten können eine rückschreitende innere Erosion auslösen, welche zusätzlich durch Suffosionsprozesse unterstützt wird. Der Begriff der Kontakterosion bezeichnet die Erosion an einer Kontaktfläche von einem feinkörnigen zu einem grobkörnigen porösen Medium hin. Die Sicherheit gegen Kontakterosion wird in der Praxis zum Beispiel zur Bemessung von Erdstofffiltern im Dammbau anhand von Filterregeln, welche umfangreich in HUBER (2008) dargestellt sind, überprüft.

Die Ablagerung von feinem Material aus dem Strömungsfluid an den Partikeloberflächen eines porösen Mediums oder in den Hohlräumen desselbigen wird nach DIN 4049-3 (1994) als

Kolmation definiert. Die Kolmation ist die Umkehrung der Suffosion und wird daher auch in innere Kolmation und Kontaktkolmation unterschieden. Im Gegensatz zur Suffosion reduzieren sich die Porosität und die Durchlässigkeit infolge des Kolmationsprozesses, während die Lagerungsdichte zunimmt. Charakteristisch für den Kolmationsprozess ist es, dass sich zuerst grobe Teilchen in den relativ engen Querschnittsstellen der Feststoffmatrix verklemmen. Dadurch reduzieren sich diese Engstellen weiter und es können nun immer feinere Partikel verklemmen. Es tritt somit ein rückschreitender Prozess ein (BUSCH et al., 1993).

Sämtliche Modellvorstellungen zur Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation basieren auf geometrischen Überlegungen bezogen auf ein Kugelmodell.

### 3.6.2 Berücksichtigung des Skineffektes

Bei der Entnahme von Wasser durch einen Brunnen wird der Grundwasserstand im Aquifer abgesenkt. Die beobachtete Absenkung des Wasserstands im Brunnen beinhaltet dabei alle im Strömungsfeld auftretenden hydraulischen Verluste. Die Abbildung 3.13 zeigt anhand des Verlaufs der Grundwasserdruckfläche diese verschiedenen Verluste. Neben den Verlusten aufgrund der Durchströmung des Aquifers, des Schüttmaterials und des Filterrohres treten weitere Verlustarten auf, welche allgemein unter dem Begriff des Skineffektes zusammengefasst werden.

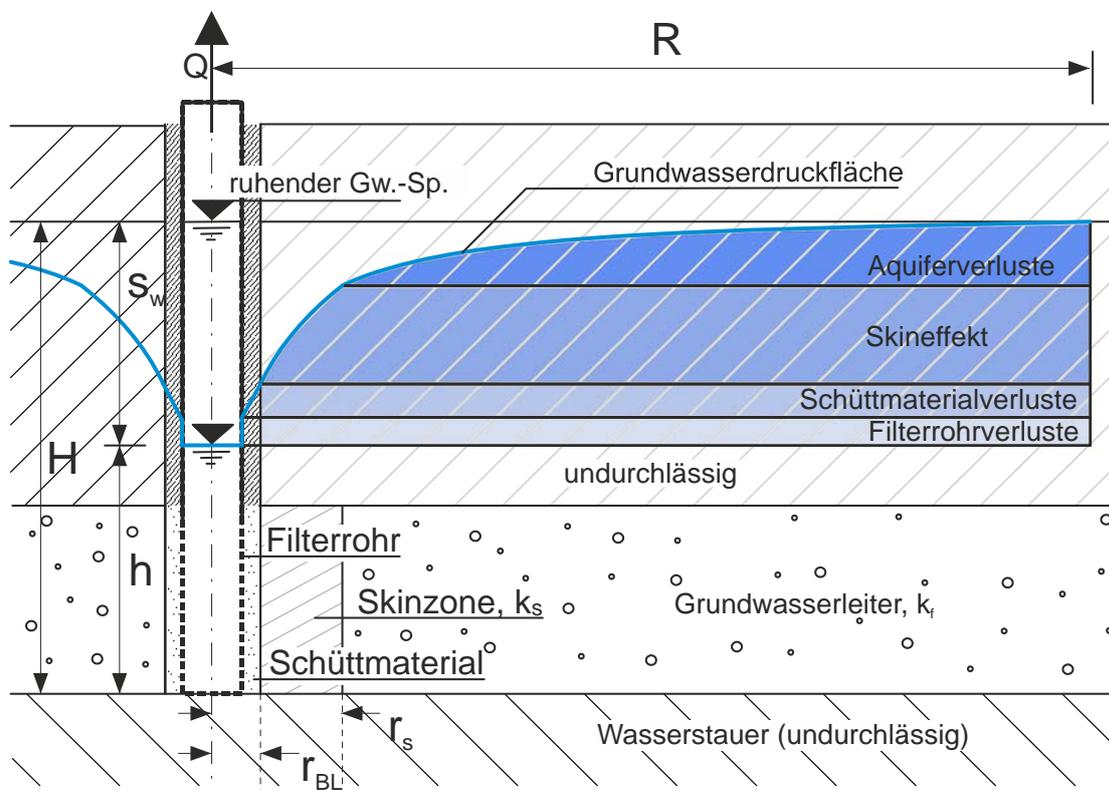


Abbildung 3.13: Strömungsfeld am Brunnen im gespannten Aquifer mit Darstellung der Skinzone und dem daraus resultierenden Skineffekt als zusätzlicher Druckverlust

Die Bezeichnung Skineffekt wurde zunächst von der Erdölindustrie geprägt. Der Grundwasserleiter wird als homogen bis zum Bohrloch angenommen und die zusätzliche Absenkung im Brunnenfilterrohr wird von einer schwer durchlässigen Haut auf der Bohrlochwand verursacht (LANGGUTH & VOIGT, 2004). Dieser Skin aus abdichtend wirkenden Materialien erzeugt einen zeitunabhängigen Durchlässigkeitsunterschied zwischen dem Grundwasserleiter und dem anstehenden Filterkies an der Bohrlochwand (siehe Abbildung 3.13).

Die kolmatisierte Zone entsteht zunächst beim Bohrvorgang und enthält häufig Reste der Bohrsuspension (Filterkuchenbildung, siehe Abbildung 3.14) oder anderes Feinmaterial. Während eines Bohrvorgangs ist der hydrostatische Druck der Bohrspülung größer als im umgebenden Aquifermaterial. Dadurch dringt die Bohrsuspension in das Aquifermaterial ein und löst einen Filtrationsprozess an der Bohrlochwand aus. Feststofffraktionen aus der Bohrsuspension werden dabei zurückgehalten und bilden eine dünnwandige Schicht mit geringer Durchlässigkeit aus (ABBOUD & CORAPCIOGLU, 1993). Aber auch während des Brunnenbetriebs wird häufig ein Kolmationsprozess im Brunnenausbau oder an der Bohrlochwandung festgestellt. In DE ZWART (2007) und DE ZWART et al., (2006) wird dieses Phänomen der mechanischen Partikelfiltration umfangreich an Trinkwasserbrunnen in den Niederlanden untersucht. Danach wird ein Kolmationsprozess am Brunnen hauptsächlich durch die Brückenbildung von Partikeln ausgelöst, wobei die Partikelkonzentration und die Strömungsgeschwindigkeit den Prozess beeinflussen (DE ZWART, 2007).

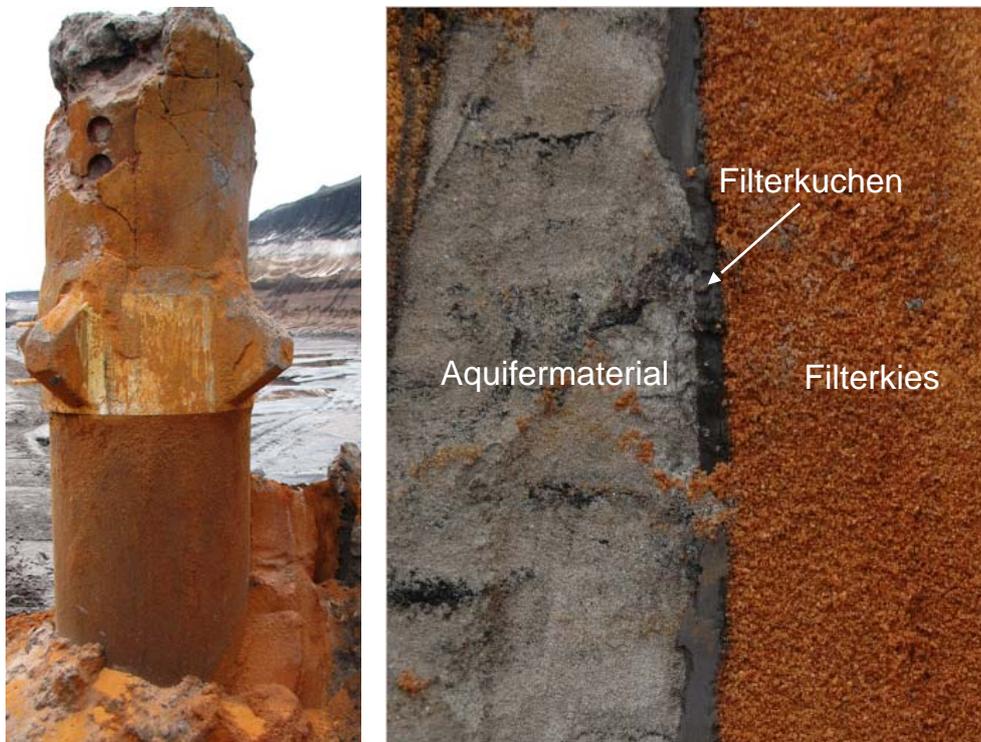


Abbildung 3.14: Filterkuchenbildung (rechts) zwischen Aquifermaterial und Filterkies bei einem freiliegenden Entwässerungsbrunnen (links) im Tagebau Garzweiler

Eine Ermittlung des Unterschiedes zwischen der Absenkung des Wasserstandes im Grundwasserleiter und der tieferen Absenkung im Brunnen  $s_w$  wurde als Erstes von JACOB (1947) über einen Leistungspumpversuch mit gesteigerten Pumpenstufen vorgenommen. Durch einen Pumpversuch ist es möglich, das Verhältnis zwischen der Absenkung im Grundwasserleiter und der Absenkung im Brunnen analytisch zu untersuchen. JACOB (1947) verwendet dabei folgende Beziehung

$$s_w = B_j \cdot Q + C_j \cdot Q^2, \quad (3.35)$$

wobei der Parameter  $B_j$  ein linearer Widerstandskoeffizient des Aquifers ist und der Parameter  $C_j$  einen nichtlinearen Brunneneintrittsverlust aufgrund hoher Fließgeschwindigkeiten im Brunnennahbereich kennzeichnet. Die Gleichung (3.35) ähnelt dabei der FORCHHEIMER-Gleichung (3.19) für die Brunnenanströmung. Der Skineffekt wird vorrangig bei der Auswertung von Pumpversuchen berücksichtigt, da in der bohrlochnahen Skinzone eine nicht unerhebliche Wassermenge zu Beginn der Absenkung gespeichert werden kann, welche die Absenkungskurven des Pumpversuches nachhaltig beeinflusst (NOVAKOWSKI, 1989).

Der Skineffekt wird mathematisch durch zwei verschiedene Ansätze abgebildet:

- Die Skinzone wird als infinitesimal dünn angenommen (vgl. Abbildung 3.4) und der Skineffekt wird als zusätzlicher Druckverlust an der Bohrlochwand berücksichtigt (VAN EVERDINGEN, 1953; RAMEY & AGARWAL, 1972; SAGEEV, 1986; KABALA & CASSIANI, 1997; CASSIANI et al., 1999; PARK & ZHAN, 2002; BARRASH et al., 2006).
- Die Skinzone wird mit einer endlichen Dicke angenommen (vgl. Abbildung 3.13) und weist damit eine zusätzliche Speicherkapazität auf (STERNBERG, 1973; EARLOUGHER, 1977; MOENCH & HSIEH, 1985; NOVAKOWSKI, 1990; BIDAUX & TSANG, 1991; KEARL, 1997; RUUD & KABALA, 1997).

Für den ersten Ansatz wird die Randbedingung am Bohrloch um einen zusätzlichen Druckverlust  $\Delta h_{Skin}$  erweitert

$$h_{BL} = h_{r=BL} - \Delta h_{Skin}, \quad (3.36)$$

welcher nach SAGEEV (1986) über den bezogenen Durchfluss zusammen mit einem dimensionslosen Skineffektparameter  $\eta_s$  in Abhängigkeit von der Skinzonendurchlässigkeit  $k_s$  und der Dicke der Skinzone  $d_s$  berechnet wird.

$$\Delta h_{Skin} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k_f} \cdot \eta_s \quad (3.37)$$

$$\eta_S = \frac{k_f}{r_{BL} \cdot \frac{k_S}{d_S}} = \alpha_{Skin} \cdot \frac{d_S}{r_{BL}} \quad (3.38)$$

Für das Verhältnis der Aquiferdurchlässigkeit  $k_f$  zur Skinzonendurchlässigkeit  $k_S$  wird der Verhältnisfaktor  $\alpha_{Skin}$  verwendet. Nach STERNBERG (1973), EARLOUGHER (1977) und KEARL (1997) wird für den zweiten Ansatz ein Skinfaktor  $S_F$  eingeführt

$$S_F = \left( \frac{k_f}{k_S} - 1 \right) \cdot \ln \left( \frac{r_S}{r_{BL}} \right) \quad (3.39)$$

mit dem Radius der Skinzone  $r_S$ . Wenn die Durchlässigkeit der Skinzone geringer als die des umgebenden Aquifers ist, wird der Skinfaktor  $S_F$  positiv. Wenn die Skinzone beispielsweise durch Entsandung entwickelt wird, ist  $S_F$  negativ. Häufig wird der Skinfaktor auch durch die folgende Gleichung abgebildet:

$$S_F = \left( \frac{k_f}{k_S} \right) \cdot \ln \left( \frac{r_S}{r_{BL}} \right). \quad (3.40)$$

MOENCH & HSIEH (1985) zeigen, dass der Ansatz nach Gleichung (3.39) für eine Skinzone mit vernachlässigbar kleinem Speichervermögen zum Skinfaktor nach Gleichung (3.40) übergeht. PARK & ZHAN (2002) führen eine Grenzwertbetrachtung durch, um nachzuweisen, dass der Ansatz für den Skinfaktor  $S_F$  nach Gleichung (3.40) für eine infinitesimale Skinzonendicke  $d_S$  in den Skineffektparameter  $\eta_S$  nach Gleichung (3.38) übergeht.

$$\lim_{d \rightarrow 0} \ln \left( \frac{r_S}{r_{BL}} \right) = \lim_{d \rightarrow 0} \ln \left( \frac{r_{BL} + d_S}{r_{BL}} \right) \cong \frac{d_S}{r_{BL}}$$

$$\text{mit } r_S = r_{BL} + d_S \quad (3.41)$$

$$\Rightarrow S_F = \left( \frac{k_f}{k_S} \right) \cdot \ln \left( \frac{r_S}{r_{BL}} \right) \cong \frac{k_f}{k_S} \cdot \frac{d_S}{r_{BL}} = \eta_S$$

Nach NOVAKOWSKI (1989) kann die Dicke einer Skinzone am Bohrloch von ein paar Millimetern bis zu mehreren Metern reichen und muss aus diesem Grund als separate Zone betrachtet werden. Für die Annahme einer infinitesimalen Skinzone wird eine höhere Durchlässigkeit durch einen vergrößerten Brunnenradius berücksichtigt. JACOB (1947) definiert diesen wirksamen Brunnenradius  $r_w$  als denjenigen Radius, welcher den zusätzlichen Druckverlust im Verhältnis zum idealen, unbeschädigten Aquifer ( $S_F = 0$ ) berücksichtigt.

$$r_w = r_{BL} \cdot e^{-S_F} \quad (3.42)$$

Nach BIDAUX & TSANG (1991) ist die Annahme einer konzentrischen Skinzone mit konstanter Durchlässigkeit  $k_s$  nicht zutreffend, weil die hydraulische Durchlässigkeit direkt am Bohrloch am größten ist und graduell mit Entfernung vom Brunnen abnimmt. Die hydraulische Durchlässigkeit ist somit abhängig vom Radius und wird als Exponentialfunktion vom Radius dargestellt:

$$\frac{k(r)}{k_\infty} = \exp\left(-\frac{u}{\left(\frac{r}{r_{BL}}\right)^w}\right). \quad (3.43)$$

Dabei stellt der Parameter  $u$  die Stärke und der Parameter  $w$  die Dicke der Skinzone dar. Diese Modellvorstellung des Skineffektes erweitert das Konzept einer Skinzone mit endlicher Dicke zu einem komplexen Skineffekt (KEARL, 1997; KABALA & CASSIANI, 1997).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist aufgrund der stationären Verhältnisse das Speichervermögen einer Skinzone nicht maßgebend. Wichtig ist der zusätzliche Druckverlust, welcher durch einen Skineffekt am Bohrloch hervorgerufen wird und mit der Gleichung (3.37) berechnet werden kann. Da in der Natur meist keine Informationen über die Durchlässigkeit einer Skinzone vorliegen, ist die Verwendung des Verhältnissfaktors  $\alpha_{skin}$  sinnvoll, um eine Reduzierung oder Erhöhung der Durchlässigkeit im Verhältnis zur Aquiferdurchlässigkeit zu berücksichtigen. Aufgrund der unzureichenden Datenlage für die Ausdehnung und Durchlässigkeit der Skinzone in Abhängigkeit vom Radius ist das komplexe Skinmodell nach Gleichung (3.43) nicht verwendbar.

### 3.6.3 Modellversuche zum Brunnengesamtsystem

In der Vergangenheit wurden mehrere Untersuchungen an Brunnenausschnittsmodellen (begrenzte Mächtigkeit eines Kreissegmentstückes) oder Zylindermodellen durchgeführt, um die hydraulischen Bemessungsgrundlagen für Vertikalfilterbrunnen zu verbessern. Eine Auflistung der experimentellen Untersuchungen enthält Tabelle 3.3. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen ausgewählter Untersuchungen werden nachfolgend dargestellt.

Für das Phänomen der Sickerstrecke werden von EHRENBERGER (1928), MUSKAT (1937) und BOSOLD (1965) Untersuchungen zur Ausbildung des Absenkungstrichters durchgeführt. Auch BOULTON (1951) untersucht den Verlauf der freien Oberfläche am Brunnen mit Hilfe der Relaxationsmethode und zeigt die Anwendbarkeit der Brunnenformel nach Gleichung (3.13) zur Ermittlung der Durchflussmenge. Der Einfluss der horizontalen Schichtung eines Grundwasserleiters auf den Verlauf der freien Oberfläche wird von NAHRGANG (1965) analysiert, wäh-

rend die Steigerung der Zustrommenge durch Entsandungsprozesse von Wendling et al. (1997) quantifiziert werden. KOROM et al. (2003) weisen nach, dass die tiefste Pumpenlage in Bezug zur Entnahmemenge die effizienteste Lage ist und die Brunneneintrittsverluste werden von RUBBERT & WOHNLICH (2006) am Modellbrunnen sichtbar gemacht.

Tabelle 3.3: Übersicht zu Modellversuchen an vollkommenen Brunnen mit Angabe der Modellart, der untersuchten Parameter und der Erkenntnisse aus der Untersuchung

Autor	Modellart	Material	Untersuchte Parameter
EHRENBERGER (1928)	Kreissegment	AM – FR	Sickerstrecke
MUSKAT (1937)	Kreissegment	AM – FR	Sickerstrecke
BOULTON (1951)	Kreissegment	AM – FR	Freie GW-Oberfläche
PETERSEN et al. (1955)	Zylindermodell	SM – FR	Eintrittswiderstand FR
FUCHS (1963)	Kreissegment	AM – SM – FR	Bemessung SM, Entsandung
BOSOLD (1965)	Kreissegment	AM – FR	Sickerstrecke
NAHRGANG (1965)	Kreissegment	AM – FR	Horizontale Schichtung GW
SOLIMAN (1965)	Kreissegment	SM – FR	Geschwindigkeitsverteilung FR
WALDE (1966)	Zylindermodell	AM – SM – FR	Ergiebigkeit FR
GEISELER (1967)	Kreissegment	AM – SM – FR	Bemessung SM, Entsandung
LEHMANN (1968)	Zylindermodell	SM – FR	Bemessung FR und SM
KLOTZ (1969)	Rechteckmodell	AM – FR	Durchlässigkeit FR
GARG & LAL (1971)	Zylindermodell	AM – SM – FR	Eintrittswiderstand FR
WILLIAMS (1985)	Kreissegment	AM – SM – FR	Brunnenbemessung
HADJHAMOU et al. (1990)	Zylindermodell	AM – SM – FR	Bemessung FR abh. von SM
WENDLING et al. (1997)	Kreissegment	AM – FR	Entsandung
KOROM et al. (2003)	Kreissegment	AM – FR	Vertikale Pumpenlage
RUBBERT & WOHNLICH (2006)	Rechteckmodell	GK – SM – FR	Eintrittswiderstand
KLAUDER et al. (2009)	Zylindermodell	AM – SM – FR	Vollständige Prozessanalyse

HADJHAMOU et al. (1990) untersuchen die geometrischen Filterkriterien für die Auswahl des Schüttmaterials mit einem gleichförmigen und einem ungleichförmigen Schüttmaterial unter Berücksichtigung einer Kolbenpumpbewegung im Filterrohr (Entsandung) während der Versuchsphase. Als Ergebnis der Untersuchung kommen sie zu dem Schluss, dass die Entsandung zu einem vergrößerten effektiven Brunnenradius führt, wobei das ungleichförmige Schüttmaterial besser für die Entsandung geeignet ist.

Die Kombination der einzelnen Materialien und ihre Auswirkung auf die Ergiebigkeit des Brunnens werden durch den Versuchsaufbau mit vorgelagertem Aquifermaterial, Schüttmate-

rial und Filterrohr nur von wenigen Untersuchungen berücksichtigt (FUCHS, 1963; WALDE, 1966; GEISELER, 1967; GARG & LAL, 1971; WILLIAMS, 1985; HADJHAMOU et al., 1990; RUBBERT & WOHLNICH, 2006).

Für die Auswertung der Versuche von WILLIAMS (1985) wird ein kritischer Radius  $r_{krit}$  eingeführt, welcher vom Brunnenmittelpunkt aus gesehen den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung beschreibt. Für die Herleitung des kritischen Radius setzt WILLIAMS (1985) die Widerstandsgleichung nach DARCY für das linear laminare Regime mit einer Widerstandsgleichung nach DARCY-WEISBACH für das turbulente Regime gleich und ermittelt daraus den hydraulischen Gradienten am Übergang zwischen beiden Regimen:

$$\left(\frac{dh}{dr}\right)_{krit} = \frac{c_W \cdot v^2 \cdot Re_{krit}^2}{g \cdot K \cdot d_{50}} = \frac{v^2 \cdot Re_{krit}}{g \cdot K \cdot d_{50}}. \quad (3.44)$$

Die Faktor  $c_W$  wird als reziproker Wert der kritischen Reynoldszahl angegeben und hängt maßgeblich von der Kornform und Packungsstruktur ab. Durch die Darstellung des Gradienten in verschiedenen radialen Abständen vom Filterrohr im Verhältnis zur Reynoldszahl nach Abbildung 3.15 wird eine mittlere kritische Reynoldszahl von 30 ermittelt.

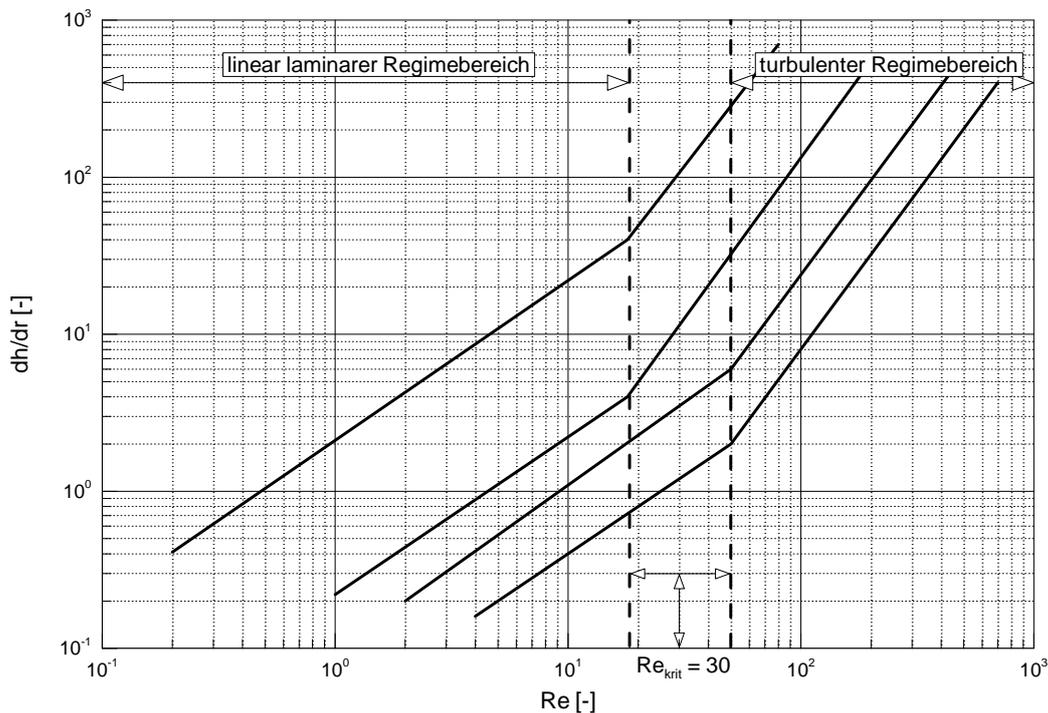


Abbildung 3.15: Hydraulischer Gradient  $dh/dr$  im Verhältnis zur Reynoldszahl  $Re$  nach Versuchsergebnissen von WILLIAMS (1985)

Nur bei GEISELER (1967) wird die Durchströmung des Aquifermaterials analysiert, in den anderen Arbeiten beschränkt sich die Untersuchung auf die Ergiebigkeit unter den gegebenen Randbedingungen mit vorgelagertem Aquifermaterial.

Bei der Hälfte der in Tabelle 3.3 aufgelisteten Untersuchungen wird nur ein bestimmtes Aquifermaterial verwendet, meist eine natürliche Aquiferkörnung. Eine Variation mit mehreren verschiedenen Böden wird bei BOSOLD (1965), FUCHS (1963) und GEISELER (1967) durchgeführt. Wenn Schüttmaterial untersucht wird, werden mit Ausnahme von SOLIMAN (1965) und GARG & LAL (1971) immer mehrere Schüttmaterialien verwendet. Die Filterrohrtypen werden bei WALDE (1966), LEHMANN (1968), PETERSEN et al. (1955), KLOTZ (1969), GARG & LAL (1971), WILLIAMS (1985) und HADJHAMOU et al. (1990) variiert. Es wurden bisher allerdings keine systematischen Brunnenmodellversuche mit einer Vielzahl von Filterrohrtypen bei unterschiedlichen Schüttmaterialien und verschiedenen vorgelagerten Aquifermaterialien durchgeführt. Dies erfolgt zum ersten Mal im Rahmen dieser Arbeit.

### 3.7 Präzisierung der Zielsetzung und der methodischen Vorgehensweise

Anhand der vorgestellten Untersuchungen wird deutlich, dass die Anströmung zum Brunnen ein komplexes radialsymmetrisches Strömungsproblem in variablen Regimebereichen darstellt. Es wurden in der Vergangenheit umfangreiche Versuche mit durchströmten Säulen in verschiedenen Regimebereichen durchgeführt, jedoch besitzen diese eine einfache Geometrie mit konstantem Strömungsgradienten. Beim Brunnen besteht die zusätzliche Problematik in der radialen Strömung (vgl. Abbildung 3.16).

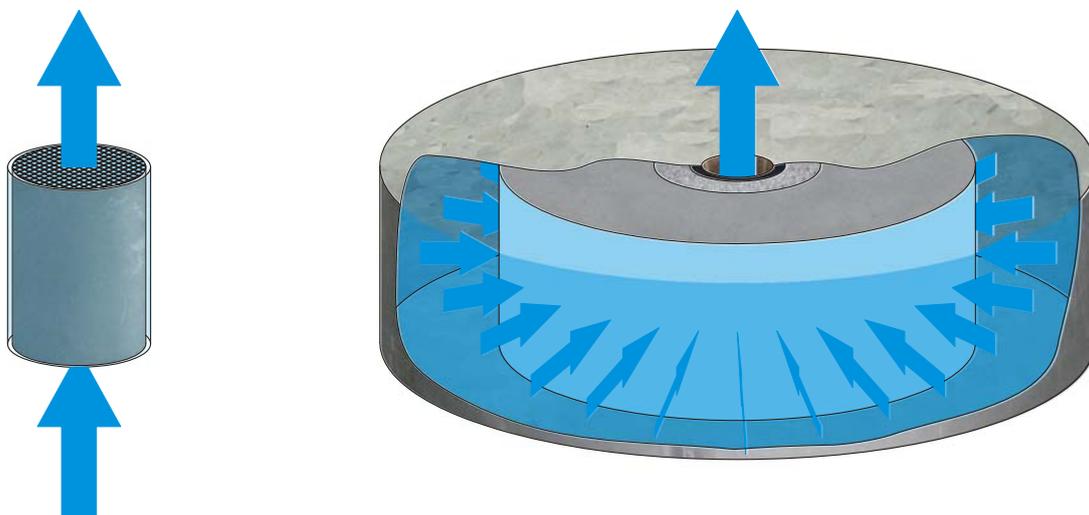


Abbildung 3.16: Vergleich der Strömungsgeometrien zwischen einfachen Säulenversuchen (links) und komplexen radialen Brunnenausschnittsmodellen (rechts)

Der Gradient ist nicht konstant über den Fließweg, ebenso ist die Fließgeschwindigkeit abhängig vom Radius. Außerdem beinhalten die Koeffizienten zur Abbildung der porösen Matrix empirische Faktoren, welche über Versuche für das jeweilige Material bestimmt werden

müssen (vgl. Kapitel 2.3). Somit muss untersucht werden, ob die Ergebnisse aus Säulenversuchen auf die Brunnenanströmung übertragen werden können.

Die bisher durchgeführten Modellversuche zur Brunnenanströmung wurden alle nicht unter Berücksichtigung der physikalisch begründeten FORCHHEIMER-Gleichung für den Übergangsbereich einer nichtlinear laminaren Strömung analysiert. Gerade im direkten Brunnennahbereich treten jedoch erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten auf und das linear laminare DARCY-Gesetz der Grundwasserströmung muss nicht mehr zwangsläufig gültig sein. Die Untersuchung poröser Medien hinsichtlich der Gültigkeit des DARCY-Gesetzes ist sehr umfangreich, wie die Literaturanalyse in Kapitel 2 zeigt. Eine Übertragung dieser Erkenntnisse auf die radiale Brunnenanströmung wurde bisher allerdings nicht vorgenommen. Obwohl von ENGELUND (1953) umfangreiche theoretische Analysen zu nichtlinearen Brunnenverlusten durchgeführt wurden, sind bisher keine experimentellen Modellversuche an Trinkwasser- oder Entwässerungsbrunnen zu dieser Problematik durchgeführt worden.

Nur für die experimentellen Untersuchungen der Arbeitsgruppe um REDDY und RAO (vgl. Kapitel 2.3.2) mit einem Konvergenz-Permeameter wird die Brunnenformel unter Berücksichtigung der FORCHHEIMER-Gleichung zur Ableitung von FORCHHEIMER-Koeffizienten bei radialer Strömung verwendet. Der Ansatz einer radialen Strömung wird bei diesen Modellversuchen im nichtlinear laminaren Regime untersucht. Als Ausgangspunkt für die Ableitung eines hydraulischen Gradienten bei konvergierender Strömung wird die Brunnenformel mit dem Widerstandsgesetz nach FORCHHEIMER verwendet. Allerdings wird dieser Ansatz nicht konsequent weiter verfolgt, sondern für die weitere Auswertung die graphische Darstellung nach Abbildung 2.9 zur Ermittlung der FORCHHEIMER-Koeffizienten verwendet. Hierfür wird jedoch der hydraulische Gradient mit einer zugehörigen Fließgeschwindigkeit benötigt. Der Gradient wird zwischen zwei Radien  $r_1$  und  $r_2$  ermittelt, allerdings sind die Fließgeschwindigkeiten zwischen den beiden Radien aufgrund der Kontinuität nicht konstant.

Die Autoren umgehen dieses Problem, indem Gradienten für verschiedene Radienverhältnisse ermittelt werden. In Abbildung 3.17 ist der Verlauf der gespannten Druckfläche bei radialer Strömung dargestellt. An jedem Radius  $r_j$  stellt sich eine Druckhöhe  $h_j$  ein. Damit können verschiedene Gradienten  $i_j$  als Druckdifferenz zu durchströmter Länge berechnet werden. Aufgrund des logarithmischen Verlaufs der Drucklinie sind diese Gradienten für unterschiedliche Radienabstände nicht gleich. Damit ist keine Ermittlung von globalen FORCHHEIMER-Koeffizienten unabhängig vom Radienverhältnis möglich. Da die Gradienten für jedes Radienverhältnis variieren, müssen zwangsläufig unterschiedliche FORCHHEIMER-Koeffizienten ermittelt werden. Diese Interpretation der Ergebnisse wird von den Autoren nicht vorgenommen.

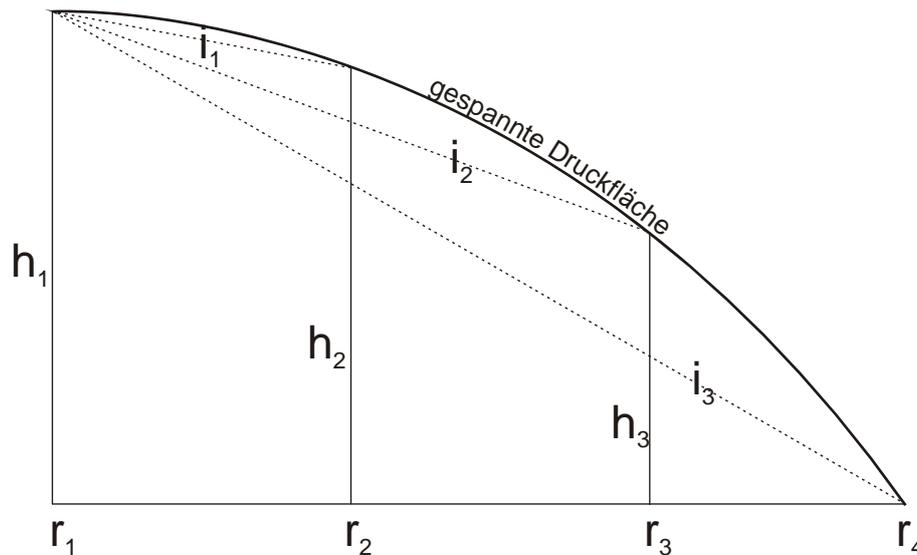


Abbildung 3.17: Darstellung der Gradienten  $i$  für verschiedene Radien  $r$  bei konvergierender Strömung

Zielführend für die Analyse der Brunnenanströmung im Nahbereich ist somit, systematische Modellversuche durchzuführen, bei denen verschiedene Filterrohre und Schüttmaterialien als Kombination mit einem vorgelagerten Aquifermaterial in verschiedenen Regimebereichen untersucht werden. Da sich das Regime bei der Brunnenanströmung ändern kann, ist zunächst das jeweils vorherrschende Strömungsregime zu bestimmen und damit das zu verwendende Fließgesetz auszuwählen. Die Koeffizienten der Einzelmaterialien sind dann anhand der Modellversuche zu ermitteln und mit vorhandenen Werten zu vergleichen, um nachzuweisen, dass die Erkenntnisse aus einfachen Säulenversuchen auf die komplexe radialsymmetrische Brunnenanströmung übertragen werden können. Das Ziel ist es, anhand der ermittelten Koeffizienten den Verlauf des Absenkungstrichters vom Außenwasserstand am Aquifermaterial bis zum Wasserstand im Filterrohr analytisch zu beschreiben. Damit ist eine Analyse der Trennflächen zwischen den Einzelkomponenten und den dort auftretenden Verlusten möglich, so dass in einem Gesamtmodell alle Verlustkomponenten zusammengefasst werden können.

Um das experimentelle Modellsystem zunächst so einfach wie möglich zu halten, werden nur gespannte Verhältnisse untersucht. Die Berücksichtigung von ungespannten Verhältnissen würde zum Auftreten einer Sickerstrecke mit Kapillareffekten führen. Außerdem ist die Brunnenformel nur für gespannte Verhältnisse im nichtlinear laminaren Bereich der FORCHHEIMER-Gleichung lösbar, da nur für gespannte Verhältnisse der Durchflussquerschnitt unabhängig vom Grundwasserstand ist. Für gespannte Verhältnisse trifft darüber hinaus die DUPUIT-Annahme zu, dass nur horizontale Fließgeschwindigkeiten auftreten. In der Tabelle 3.4 sind die Unterschiede zwischen gespannten und ungespannten Verhältnissen für ausgewählte Parameter zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.4: Vergleich verschiedener Parameter für einen gespannten Grundwasserleiter und einen Grundwasserleiter mit freier Oberfläche

Parameter	Gespannter Aquifer	Aquifer mit freier Oberfläche
Obere Begrenzung	Wasserstauer	Grundwasserspiegel mit Kapillarraum
Randbedingung oben	Druck > Atmosphärendruck	Atmosphärendruck
Wassersättigung	vollständig	teilweise
Radialer Durchflussquerschnitt	$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m$	$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$
Fließrichtung	horizontal	horizontal und vertikal
Randbedingung im Brunnen	Brunnenwasserstand	Brunnenwasserstand & Sickerstrecke
Regimeabhängige Brunnenformel	ja	nein

## 4 Experimentelle Untersuchung der Brunnenanströmung

### 4.1 Vorbemerkungen

Um quantitative, auf die Praxis übertragbare Aussagen über das Widerstandsverhalten verschiedener Brunnenbauten zu erhalten, wurde in der Versuchshalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen ein Ausschnittsmodell eines Sumpfungsbrennens für die Entwässerung von Braunkohlentagebauen entwickelt. Der Versuchsstand wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Untersuchung von Filterrohren in Kombination mit Schüttmaterialien (Filterkiesen) für die Tagebautentwässerung verwendet. Ziel dieses Projektes in Form einer Forschungsk Kooperation mit der RWE Power AG war es, den Brunnenbauwiderstand aufgrund des durchströmten Filterkieses und Filterrohres zu reduzieren, indem die Auswahl der Komponenten optimal aufeinander und auf das umgebene Aquifermaterial abgestimmt wurde. Die im Rahmen des Forschungsprojektes gemessenen Werte und erzielten Ergebnisse werden für diese Arbeit zur grundlegenden Analyse der Anströmungsprozesse im Nahbereich eines Brunnens verwendet.

### 4.2 Modellkonzept

Das Modell, dargestellt in Abbildung 4.1, besteht aus folgenden, im Kreislauf durchströmten, Komponenten: einem Betriebsbehälter mit Pumpe, einer Hochbehältersäule für die DruckhöhenEinstellung, einem Versuchsbehälter sowie einem Messwehrkanal zur Durchflussmessung. In dem zylindrischen Versuchsbehälter wird eine 0.5 m hohe horizontale Scheibe eines realen Brunnenbaus mit Filterrohr und Filterkies im Maßstab 1:1 mit umgebendem Aquifermaterial eingebracht, die radial an- bzw. durchströmt wird. Der gesamte Brunnenaufbau wird mit einer variablen Überdruckhöhe von außen angeströmt und entlastet im Zentrum des Brunnens mit der verbleibenden Druckhöhe nach oben. Es werden somit gespannte Grundwasserverhältnisse nachempfunden. Die Brunneneintrittswiderstände werden über die Messung der Druckverluste beim Durchströmen der Einzelelemente des Brunnenaufbaus – Filterkies und Filterrohr – quantifiziert. Dadurch ist eine direkte, vergleichende Aussage über die auftretenden hydraulischen Druckverluste in Abhängigkeit von der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  bei verschiedenen Brunnenbauten möglich.

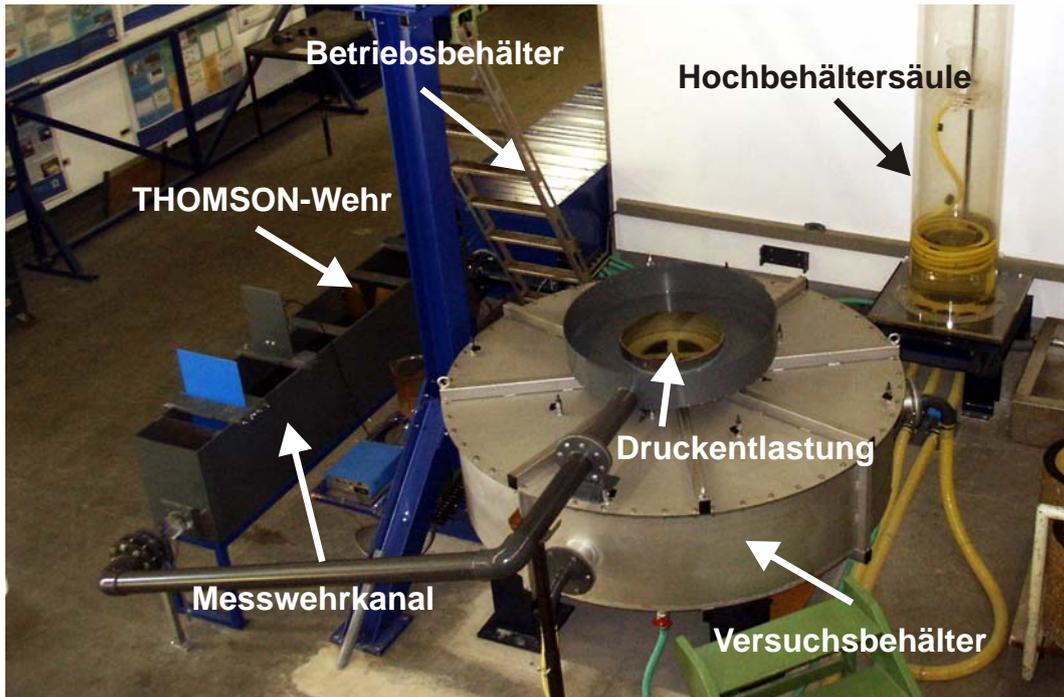


Abbildung 4.1: Versuchsstand mit den Komponenten Betriebsbehälter, Hochbehältersäule, Versuchsbehälter, Druckentlastung, Messwehrkanal und THOMSON-Wehr

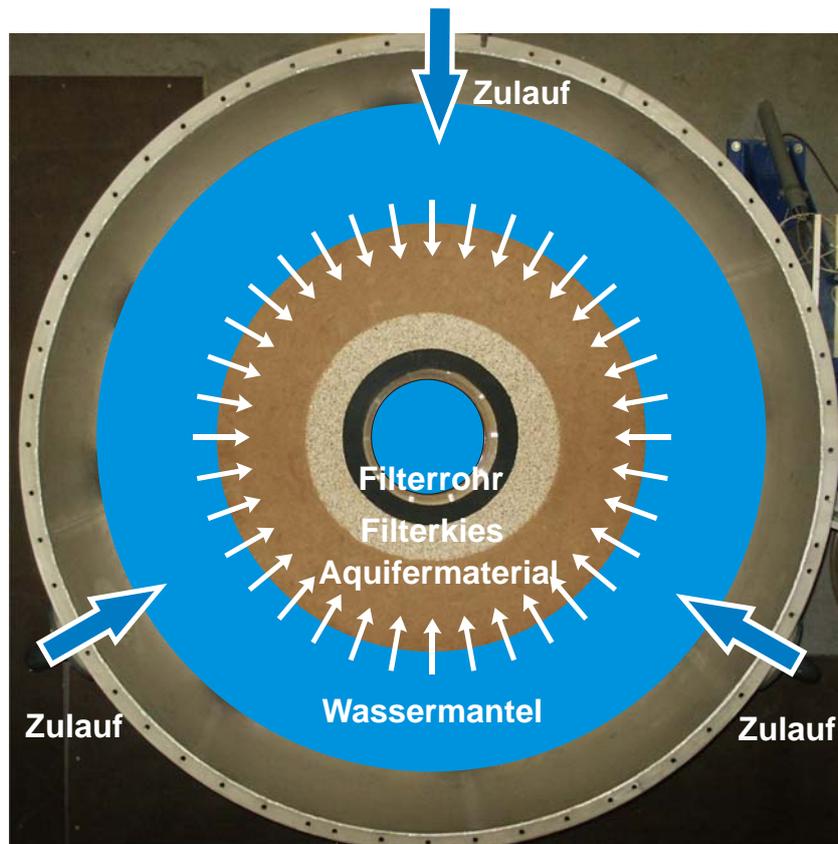


Abbildung 4.2: Darstellung der radialen Anströmung aus dem Wassermantel in das Aquifermaterial bei einem beispielhaften Brunneneinbau im Versuchsbehälter mit Filterrohr, Filterkies und Aquifermaterial

Des Weiteren wird die Wassertemperatur im Versuchsbehälter gemessen und mittels eines kalibrierten THOMSON-Wehrs der Durchfluss der freien Entlastung bestimmt. Das Versuchsprogramm umfasst die Verwendung unterschiedlicher in der Tagebauentwässerung eingesetzter Filterrohre. Diese werden in Kombination mit verschiedenen Kornfraktionen des Filterkieses aus dem Standardlieferprogramm der RWE Power AG und dem im Tagebau anstehenden Aquifermaterial untersucht.

Zentraler Bestandteil des Versuchsstandes ist der in Abbildung 4.2 dargestellte zylindrische Edelstahlbehälter mit einem Durchmesser von 175 cm, in dem ein Brunnenaufbau mit umgebendem Aquifermaterial realisierbar ist. Der Behälter wird über drei Zuläufe mit Wasser beschickt, die seitlich über die Mantelfläche des Zylinders gleichmäßig verteilt sind. Der Probenkörper wird radial durchströmt und das Wasser strömt im Zentrum des Behälters im Freispiegelabfluss nach oben. Durch einen Sandfang unterhalb der freien Brunnenentlastung werden größere Partikel durch Sedimentation aufgefangen. Um variable hydraulische Gradienten und somit auch variable Filtergeschwindigkeiten zu erzeugen, kann der gesamte Brunnenaufbau stufenlos über eine Hochbehältersäule aus Plexiglas mit einer Überdruckhöhe von 1 cm bis 380 cm beaufschlagt werden. Das für den Versuchsbetrieb benötigte Wasser zirkuliert in einem eigenen Wasserkreislauf, in dem mehrere Behälter eingebunden sind.

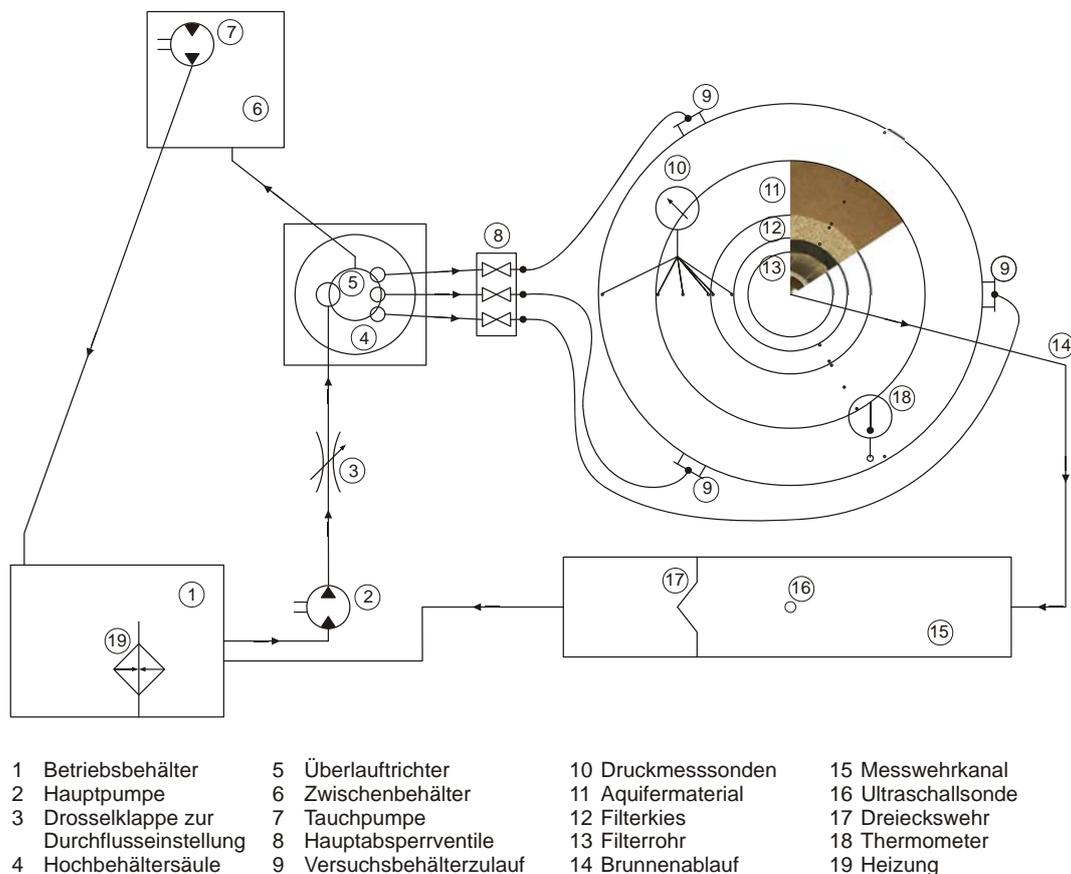


Abbildung 4.3: Schematische Übersicht mit Darstellung und Bezeichnung der einzelnen Komponenten

In Abbildung 4.3 sind die einzelnen Komponenten des Kreislaufes schematisch dargestellt. Aus dem Betriebsbehälter wird das Wasser über die Hauptpumpe in die Hochbehältersäule gepumpt. Dabei regelt eine einstellbare Drosselklappe den Durchfluss der Pumpe. In der Hochbehältersäule ist ein vertikal verstellbarer Überlauftrichter installiert, so dass eine konstante Wassersäulenhöhe zentimetergenau einstellbar ist. Das überschüssige Wasser, welches in den Überlauftrichter strömt, wird in einem Zwischenbehälter gesammelt und bei Erreichen eines Grenzvolumens mittels einer Tauchpumpe wieder zurück in den Betriebsbehälter gefördert. Von der Hochbehältersäule führen drei mit Absperrventilen versehene Zuläufe zum Versuchsbehälter.

Der Brunnenausbau mit umgebenden Aquifermaterial ist im Versuchsbehälter immer von einer Ringschicht aus Wasser (Wassermantel, siehe Abbildung 4.2) umgeben, so dass eine über die gesamte Mantelfläche gleichmäßig verteilte Anströmung eingehalten wird. Das Aquifermaterial wird dabei durch ein Lochblech mit feinmaschigem Metallvlies von der Wasserschicht getrennt. Nach der radialen Durchströmung des Brunnenausbaus mit der umgebenden Aquifermaterialschicht entlastet das Wasser im Zentrum des Versuchsbehälters und wird von dort über einen Brunnenablauf zum Messwehrkanal mit fest installiertem THOMSON-Wehr geführt. Nach Passieren des Wehres fließt das Wasser wieder zurück in den Betriebsbehälter.

### 4.3 Verwendete Materialien

Für die Untersuchungen wird ein natürliches Aquifermaterial verwendet, welches aus einem Abbaugelände (Horizont 6b) im Braunkohlentagebau Garzweiler stammt. Während das Aquifermaterial immer gleich bleibt (vgl. Sieblinien in Abbildung 4.4), werden die Filterkiese im Versuchsprogramm variiert. Folgende Filterkiese, deren Korngrößenverteilungen in Abbildung 4.5 dargestellt sind, werden im Versuchsstand untersucht:

- FK 0.7-1.4 mm
- FK 0.7-1.4 mm mit einem Unterkornanteil nach DIN 4924
- FK 0.7-1.4 mm aus einer anderen Lagerstätte (aL)
- FK 0.7-1.4 mm mit einem erhöhten Unterkornanteil (hU)
- FK 0.7-2.2 mm
- FK 1.0-2.0 mm
- FK 1.4-2.2 mm
- FK 2.0-3.15 mm
- GK 1.25-1.65 mm

Als Sonderuntersuchung werden statt eines natürlichen Filterkieses als Schüttmaterial künstliche Glaskugeln (GK) der Abstufung 1.25-1.65 mm in der Versuchsanlage untersucht.

Alle verwendeten Materialien wurden in Bigpacks zu je 1 m<sup>3</sup> angeliefert und auf dem Hof der Versuchshalle gelagert. Mit den durchgeführten Siebanalysen nach Kapitel 4.6.2 wird sichergestellt, dass sich das gelieferte Material nicht in seiner Korngrößenzusammensetzung von Bigpack zu Bigpack unterscheidet.

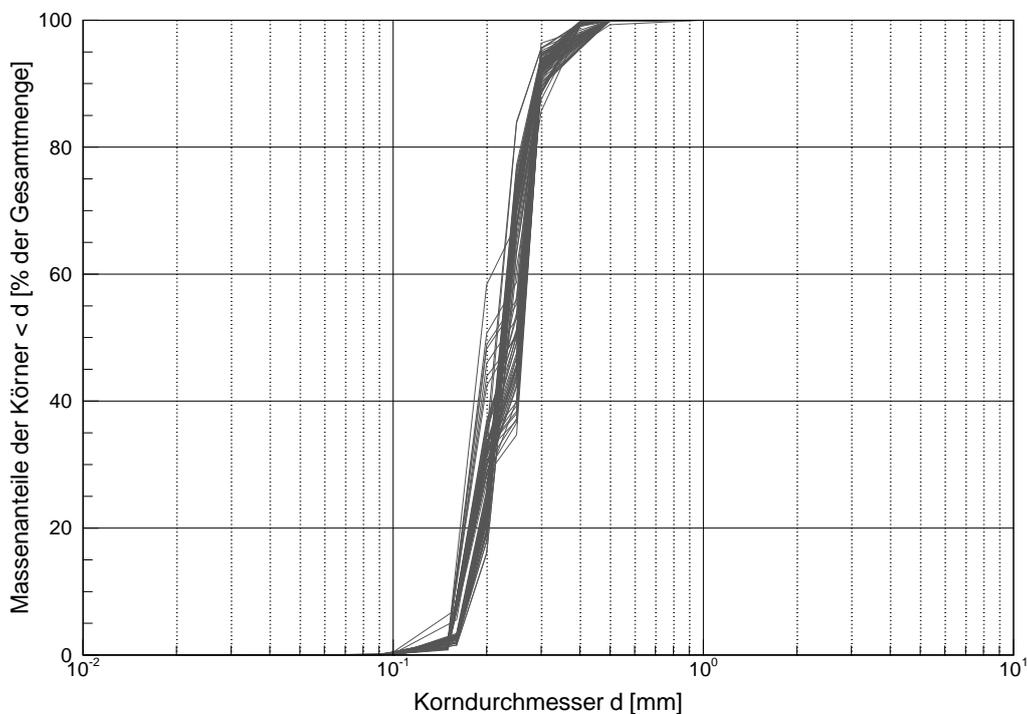


Abbildung 4.4: Sieblinien des verwendeten Aquifermaterials

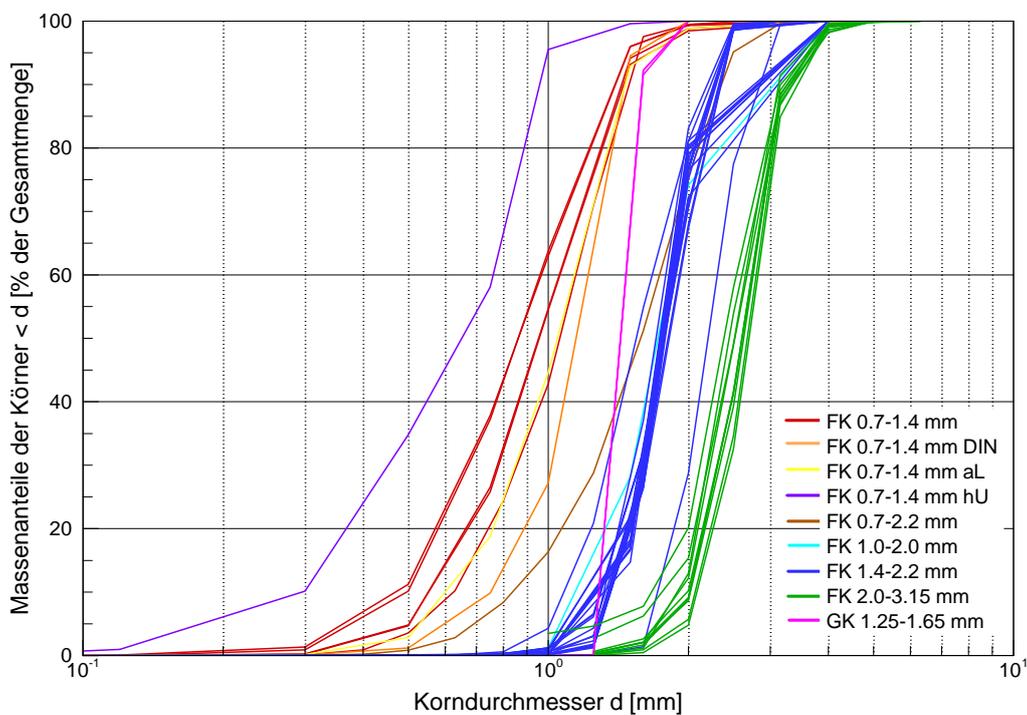


Abbildung 4.5: Sieblinien der verwendeten Filterkiese



Abbildung 4.6: Darstellung der verschiedenen Filterrohrtypen für den Einsatz im Versuchsbehälter

Für die Untersuchungen werden fünf verschiedene Filterrohrtypen, die in der Tagebauentwässerung zum Einsatz kommen, verwendet (siehe Abbildung 4.6). Der Schlitzbrückenfilter (SBF) ist ein Stahlfilterrohr mit Schlitzbrückenlochung und wird entweder als kiesbeklebte Variante mit 3-5 mm (Schlitzweite 2.5 mm) und 4-7 mm (Schlitzweite 3.5 mm) oder unbeklebt mit einer Schlitzweite von 1.0 mm untersucht.

Der Kieslochfilter (KLF) besteht aus einem durch Bohrlöcher perforierten Innenrohr aus Glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit aufgeklebtem Filterkiesmantel, während der Kiesstabfilter (KSF) aus einem verklebten Filterkiesmantel mit innen liegenden Zugelementen aus GFK-Stäben aufgebaut ist. Der Kiesloch- und der Kiesstabfilter werden jeweils mit einer Kiesbekleidung von 3-5 mm und 4-7 mm als DN 300 verwendet. Zusätzlich steht der Kiesstabfilter mit der Kiesbekleidung 3-5 mm auch als DN 400 zur Verfügung.

Der Wickeldrahtfilter (WDF) entsteht durch die Spiralwicklung von Profildrähten um zylindrisch angeordnete Drahtlängsstäbe, wobei die Berührungspunkte verschweißt werden. Der WDF steht mit den Spaltweiten 0.5 mm, 0.8 mm und 1.0 mm als DN 300 zur Verfügung. Die Spaltweite von 0.5 mm wird auch in der Ausführung als DN 400 untersucht.

Der Scheibenfilter (SF) entsteht durch das Aufeinanderstecken von horizontalen Kunststoffscheiben. Diese Scheiben werden mit Bohrungen versehen, durch die ein GFK-Stab gesteckt wird. Die Spaltweite ist dabei variabel von 0.5 mm bis 1.5 mm einstellbar. Der SF ist als DN 300 und DN 400 verfügbar. Die Abmessungen aller verwendeten Filterrohre sind mit den Angaben der freien Durchtrittsfläche  $A_p$  (Angaben RWE Power AG) in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Abmessungen der verwendeten Filterrohre

Filterrohr	DN [mm]	Schlitz-/ Spaltweite [mm]	Kornfraktion der Beklebung [mm]	$r_{Br}$ [mm]	$r_{FR}$ [mm]	$A_p$ [%]
SBF	300	2.5	3-5	158	190	2.66
SBF	300	3.5	4-7	159	190	3.66
SBF	300	1.0	-	159	168	6.3
KLF	300	-	3-5	146	190	2.9
KLF	300	-	4-7	148	190	2.9
KSF	300	-	3-5	149	190	14.7
KSF	300	-	4-7	149	190	14.7
KSF <sub>Hobas</sub>	300	-	4-7	142	190	14.7
KSF	400	-	3-5	196	245	14.6
WDF	300	0.5	-	147	153	14.5
WDF	300	0.8	-	148	154	21.3
WDF	300	1.0	-	148	154	25.3
WDF	400	0.5	-	200	208	11.7
SF	300	0.5-1.5	-	145	170	9.0-22.8
SF	400	0.5	-	192	232	7.6

## 4.4 Messtechnik

Die für diesen Modellversuch konzipierte Messtechnik zur Druck-, Durchfluss- und Temperaturmessung verfügt über eine vollautomatisierte Messdatenerfassung und besteht zu einem großen Teil aus am IWW entwickelten und gefertigten Komponenten. Bei den einzelnen Messgeräten wird jeweils die Güte der Messwerterfassung angegeben. Die Güte einer Messung wird durch die Genauigkeit und die Empfindlichkeit des verwendeten Messgerätes bestimmt (PLATE, 1993). Mit der Genauigkeit eines Messgerätes wird angegeben, wie präzise der Messwert ohne systematische Fehler erfasst werden kann. Die Empfindlichkeit des Messgerätes stellt die Auflösung der Messskala dar.

### 4.4.1 Druckmessung

Die Messung der auftretenden Druckdifferenzen wird über lokale Druckmessstellen realisiert. Dazu befinden sich auf drei Messachsen im Versuchsbehälterboden Druckanbohrungen an elf verschiedenen Radien, welche in Abbildung 4.7 dargestellt sind.

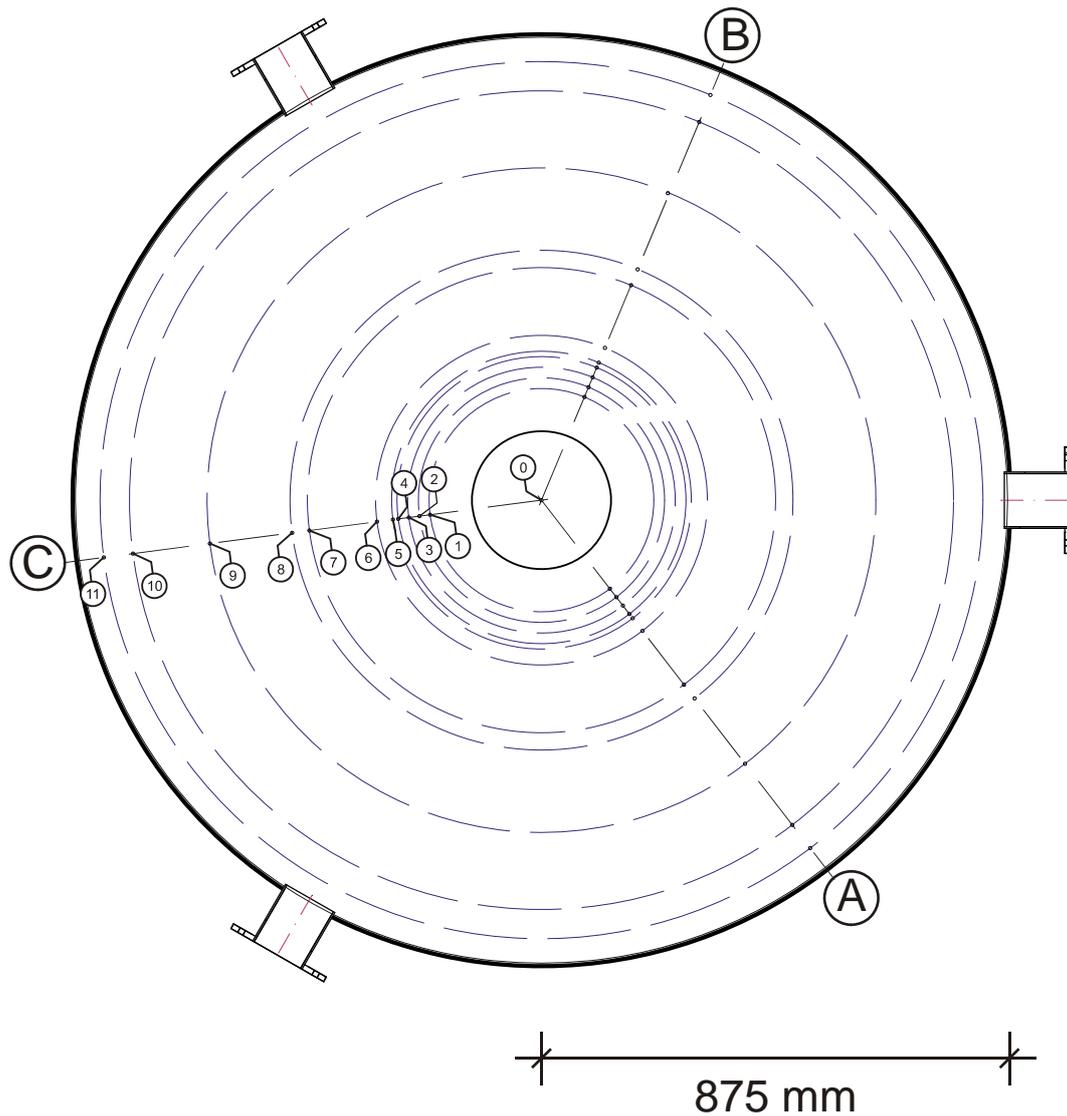


Abbildung 4.7: Druckanbohrungen an verschiedenen Radien auf der Messachse C im Versuchsbehälterboden für die Installation der Druckmesstechnik

Die Druckanbohrungen werden über eine Magnetventilbox mit 24 Anschlüssen und einer nachgeschalteten hochauflösenden Kalibrierdruckmesssonde (Mecotec DP300–C) zur Bestimmung des Differenzdruckes geregelt. Der Messbereich der Druckmesssonde reicht von 0 bis 400 mbar mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.1$  mbar bei einer Auflösung von 0.01 mbar, wobei eine Langzeitstabilität von 0.01 % pro Jahr vorliegt. Je Messzyklus werden die einzelnen Druckmessstellen nacheinander abgefragt, wobei die Magnetventilbox das Umschalten zwischen den einzelnen Druckmessstellen steuert. Insgesamt sind 34 Druckmessstellen (11 Druckmessstellen pro Achse und der Mittelpunkt) vorgesehen, welche abhängig von der aktuellen Versuchskonfiguration durch das Messprogramm unterschiedlich angesteuert werden. Tabelle 4.2 führt die einzelnen Druckanbohrungen mit dem zugehörigen Radius und der Bezeichnung auf.

Tabelle 4.2: Übersicht der Druckanbohrungen auf den drei Achsen mit dem jeweiligen Radius

Nummer	Achse	Radius [mm]
0	A, B, C	0
1	A, B, C	210
2	A, B, C	230
3	A, B, C	250
4	A, B, C	270
5	A, B, C	280
6	A, B, C	320
7	A, B, C	425
8	A, B, C	470
9	A, B, C	625
10	A, B, C	770
11	A, B, C	825

Zum Schutz vor einem Sandeintrag werden alle Druckanbohrungen mit einer Kappe versehen, wie sie Abbildung 4.8 zeigt. Diese Kappe besteht aus einer aufgebohrten Deckelmutter, welche auf das Gewinde der Druckanbohrung geschraubt wird. Die aufgebohrte Öffnung wird durch ein eingelegtes Metallvlies gegen Sandeintrag geschützt. Die Kalibrierung der Druckmesssonde erfolgt über ein Standrohr. Vor jedem Versuchsstart wird der gemessene Wert jeweils mit dem Standrohrwert verglichen und so die Genauigkeit und Funktionsfähigkeit der Anlage überprüft.



Abbildung 4.8: Aufgebohrte Deckelmutter als Kappe für die Druckanbohrung

#### 4.4.2 Temperaturmessung

Im Versuchsbehälter ist im Bereich der Ringschicht aus Wasser eine elektronische Temperaturmesssonde (National Semiconductor LM35) installiert, welche bei einer Nenntemperatur

von 25 °C mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.1$  °C und einer Auflösung von 0.1 °C misst. Die Temperatur wird zu Beginn jedes Messzyklus abgefragt.

#### 4.4.3 Durchflussmessung

Zur Bestimmung des Durchflusses wird ein Messwehrkanal mit einem kalibrierten Dreieckswehr nach THOMSON verwendet, bei dem der Abfluss als Funktion des aufgestauten Wasserspiegels sehr genau bestimmt werden kann (BOS, 1989). Der Messwehrkasten ist direkt hinter der Brunnenentlastung in den Wasserkreislauf eingebunden. Die Erfassung der Überfallhöhe  $h_w$  erfolgt digital über eine Ultraschallpegelsonde (Microsonic mic+35/IU/TC, Auflösung 0.18 mm). Diese Sonde verfügt über eine interne Kompensation der Temperaturdrift bei Änderung der Umgebungstemperatur, so dass die Genauigkeit der Messwerterfassung unter 2 % liegt. Aufgrund der Sensitivität der Sonde bei kurzzeitigen Schwankungen der Umgebungstemperatur durch Luftströmungen ist die Sonde durch einen Plexiglaskasten vor einer direkten Luftzirkulation geschützt. Durch die Bestimmung der Überfallhöhe  $h_w$  kann nach BOLLRICH (2007) der Durchfluss  $Q$  über das Messwehr bestimmt werden:

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \alpha \cdot h_w^{5/2}. \quad (4.1)$$

Der halbe Öffnungswinkel  $\alpha$  des verwendeten Dreieckswehres beträgt 15° und der Funktionsverlauf des Überfallbeiwertes  $\varepsilon$  wurde durch Auslitern kalibriert. Der Durchfluss wird nach jeder Abfrage einer Druckmessstelle ermittelt, so dass pro Messzyklus in Abhängigkeit von der angesteuerten Messstellenanzahl mehrere Durchflusswerte bestimmt werden, welche bei der Auswertung gemittelt werden.

Für die Bestimmung der radialen Fließgeschwindigkeiten wird der gemessene Durchfluss basierend auf der Kontinuitätsgleichung (3.14) für die einzelnen Radien durch die Zylindermantelfläche (Zylinderhöhe  $m = 0.5$  m) dividiert.

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \Rightarrow v(r) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot m} \quad (4.2)$$

Somit wird die Fließgeschwindigkeit jeweils am ersten und letzten Druckmesspunkt für das Aquifermaterial, am ersten Druckmesspunkt im Filterkies und am Außen- und Innenradius des Filterrohrs unter Verwendung der Druckmessradien nach Tabelle 4.2 berechnet.

## 4.5 Messablauf und die Messung beeinflussende Parameter

### 4.5.1 Messzyklus

Für jede Versuchskonfiguration werden mehrere Ausgangsdruckhöhen, welche über die Hochbehältersäule eingestellt werden, mit entsprechenden Durchflüssen untersucht. Je Ausgangsdruckhöhe werden mindestens 20 Messzyklen durchgeführt, aus denen ein arithmetischer Mittelwert sowie die Standardabweichung für jeden Parameter bestimmt werden. In allen folgenden Abbildungen in Kapitel 4 und 5 erfolgt die Darstellung der Standardabweichung der Einzelwerte als horizontaler Fehlerbalken für die Durchflussmessung und als vertikaler Fehlerbalken für die Druckmessung. Pro Messzyklus werden alle angesteuerten Messstellen nacheinander nach einem vorgegebenen Schema abgefragt und digital erfasst. Für die Druckmessung werden aus den drei Messachsen jeweils gemittelte Werte für die einzelnen Radien berechnet. Die Zeitdauer eines Messzyklus beträgt je nach Versuchskonfiguration maximal 540 Sekunden. Die Aufzeichnung aller Messwerte erfolgt über einen PC mit digitaler Datenerfassungskarte (NI USB-6009, Auflösung 14 bit, Abtastrate 48 kS/s).

### 4.5.2 Einfluss der Temperatur

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, hängen die physikalischen Eigenschaften des Wassers von der Temperatur ab. Ein Temperatureinfluss auf die Durchströmung des Versuchsbehälters muss daher bei der Auswertung der Daten berücksichtigt werden. Anhand der folgenden Gleichung nach POISEUILLE (1843) wird die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität  $\nu$  berücksichtigt mit

$$\nu(\theta) = \frac{0.01779 \cdot 10^{-4}}{1 + 0.03368 \cdot \theta + 0.00022099 \cdot \theta^2} \quad \text{mit} \quad \nu(\theta = 10^\circ\text{C}) = 1.306 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right], \quad (4.3)$$

wobei die gemessenen Durchflusswerte mit dem dimensionslosen Faktor  $\nu(\theta)/\nu_{10^\circ\text{C}}$  multipliziert werden. Auf diese Weise werden die zuvor für einen Messzyklus arithmetisch gemittelten Durchflusswerte in Abhängigkeit der gemessenen Wassertemperatur auf einen Durchflusswert bei 10 °C normiert. Diese Temperatur entspricht der durchschnittlichen Grundwassertemperatur nach DIN 18130-1 (1998). Die Temperaturabhängigkeit der Dichte  $\rho_w$  des Wassers hat in dem gemessenen Temperaturbereich von 20 °C bis 35 °C einen vernachlässigbar geringen Einfluss (vgl. Abbildung 2.6) und wird daher nicht berücksichtigt.

### 4.5.3 Einfluss der Luft

Luftporen im porösen Material verengen den Durchflussquerschnitt und verringern dadurch die Durchlässigkeit des Materials. Daher muss das im Versuchsbehälter eingebrachte Material

vollständig wassergesättigt sein und von entlüftetem Wasser durchströmt werden (BEAR, 1972; LEHMANN, 1968; KANY & HEINISCH, 1977; KLOTZ, 1971; TODD, 1959). Da das Material im trockenen Zustand eingebaut und verdichtet wird, ist vor dem Versuchsstart eine langsame Wässerung des Einbaus und eine Anlaufzeit zum Ausscheiden der Luft zu berücksichtigen. Die Menge der im Wasser gelösten Luft hängt von dem Absorptionskoeffizienten ab, welcher wiederum temperaturabhängig ist (HÖLTING & COLDEWEY, 2005). Aus diesem Grund wird das für den Kreislauf verwendete Leitungswasser durch einen Tauchsieder zunächst auf 26 °C erwärmt und eine Versuchsanlaufphase von mindestens 48 Stunden vorgesehen. In dieser Zeit steigt der gemessene Durchfluss kontinuierlich an, bis ein konstanter Durchfluss erreicht wird (siehe Abbildung 4.9). Erst danach startet die eigentliche Untersuchung mit einer Wassertemperaturbandbreite von 23 °C bis 31 °C in Abhängigkeit von der zum Messzeitpunkt vorherrschenden Lufttemperatur in der Versuchshalle.

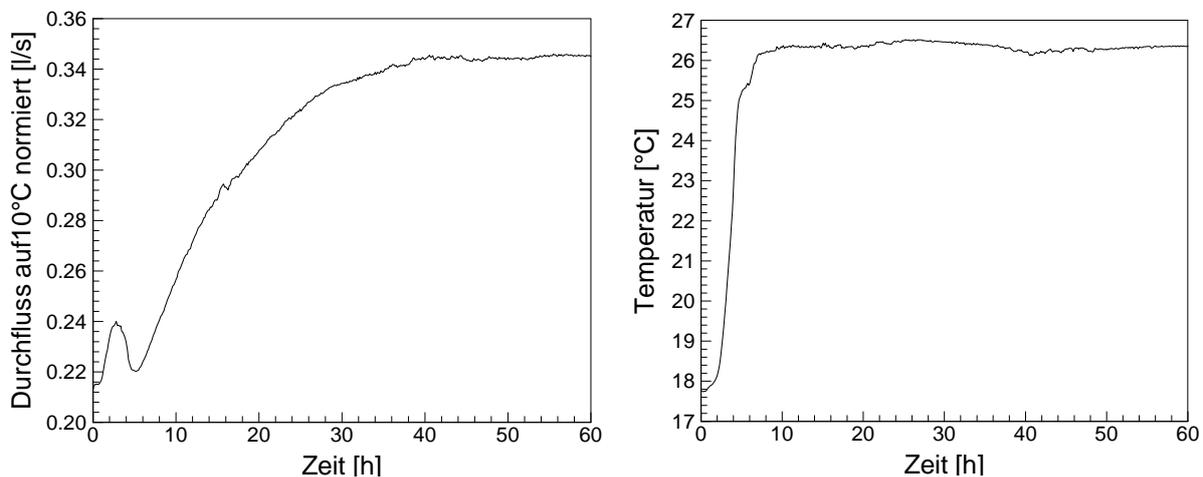


Abbildung 4.9: Normierter Durchfluss (links) und Wassertemperatur (rechts) während einer beispielhaften Versuchsanlaufphase

## 4.6 Geotechnische Untersuchungen

### 4.6.1 Bestimmung der Lagerungsdichte

Für jeden durchgeführten Einbau wird die verbrauchte Materialmenge an Aquifermaterial und Filterkies durch Wägung bestimmt (verwendete Waage Model PAKWA, Genauigkeit  $\pm 1\%$  vom Messwert + 0,1 kg, Auflösung 0,1 kg). Dividiert durch das gefüllte Volumen, welches sich aus der Geometrie des Einbaus bestimmen lässt, erhält man die erzielte Lagerungsdichte  $\rho_{LD}$ . Anhand von Vorversuchen wird die Verdichtungsmöglichkeit des Aquifermaterials untersucht und eine Ziellagerungsdichte von 1,6 t/m<sup>3</sup> bestimmt, welche mit der in situ gemessenen Trockendichte für dieses Material übereinstimmt (vgl. SCHÜTTRUMPF et al., 2009). Dieser Wert soll nach Möglichkeit bei jedem Materialeinbau erreicht werden. Der anfängliche Was-

sergehalt des eingebauten Aquifermaterials ist bei allen Versuchen unter 10 %, so dass der Wassergehalt das Einbaugewicht nicht signifikant beeinflusst. Die Auswertung der Lagerungsdichtenbestimmung für alle durchgeführten Versuchskonfigurationen mit eingebautem Material ist in Abbildung 4.10 für die Filterkiese und für das Aquifermaterial dargestellt, wobei sich die Nummern der Versuchskonfigurationen auf die Tabelle 4.7 und Tabelle 4.8 beziehen. Die statistische Auswertung der Lagerungsdichte für alle Versuchskonfigurationen zeigt Tabelle 4.3.

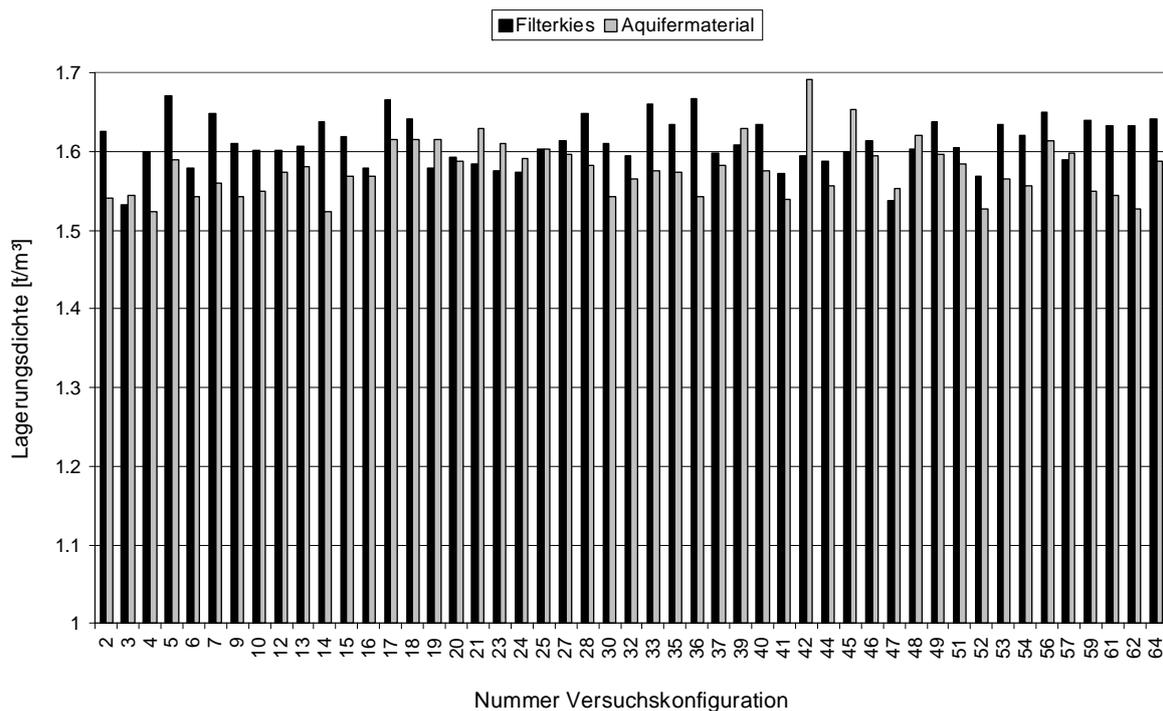


Abbildung 4.10: Ermittelte Lagerungsdichten des Filterkieses und Aquifermaterials für alle Versuchskonfigurationen mit eingebautem Material

Tabelle 4.3: Statistische Auswertung der erzielten Lagerungsdichten für alle Versuchskonfigurationen mit eingebautem Material

Material	Mittelwert	Standardabweichung
Filterkies	1.61 t/m <sup>3</sup>	2.0 %
Aquifermaterial	1.58 t/m <sup>3</sup>	2.3 %

Zur Sicherstellung gleichbleibender Versuchsrandbedingungen wird zu Beginn der Untersuchungen eine Systematik für den Materialeinbau erarbeitet. Das Aquifermaterial und der Filterkies werden im trockenen Zustand für jeden Versuch neu eingebaut und manuell verdichtet. Durch ein lagenweises Einbringen beider Materialien in Schritten von 5-6 cm mit anschließender Verdichtung wird das Erreichen der Ziellagerungsdichte sichergestellt. Dabei wird das Aquifermaterial vom Filterkies durch einen dünnen Metallring getrennt. Dieser Me-

tallring wird lagenweise hochgezogen, so dass die Verdichtungsarbeit den jeweils entstehenden Hohlraum zwischen Aquifermaterial und Filterkies sofort schließt.

Die Porosität  $n$  des eingebauten Materials ergibt sich aus dem Quotienten von Porenvolumen  $V_P$  zum Gesamtvolumen  $V_{ges}$  nach Gleichung (2.3), wobei die Differenz aus dem Gesamtvolumen  $V_{ges}$  abzüglich des Feststoffvolumens  $V_F$  das Porenvolumen  $V_P$  darstellt. Dabei ist das Porenvolumen abhängig von der Lagerungsdichte. Die Porosität  $n$  der eingebauten Materialien lässt sich unter Annahme einer Korndichte  $\rho_S$  von  $2.65 \text{ t/m}^3$  aus der erzielten Lagerungsdichte  $\rho_{LD}$  bestimmen.

$$n = 1 - \frac{\rho_{LD}}{\rho_S} \quad (4.4)$$

Mit der Auswertung nach Gleichung (4.4) ergibt sich eine mittlere Porosität von 0.391 (Standardabweichung 3.4 %) im Filterkies und eine mittlere Porosität von 0.405 (Standardabweichung 3.3 %) im Aquifermaterial.

#### 4.6.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Zur Charakterisierung der Materialien wird sowohl vor dem Einbau als auch nach jedem abgeschlossenen Versuch eine Bestimmung der Korngrößenverteilung vorgenommen. Hierfür wird eine Trockensiebung mit einer Drahtsiebbodenmaschine (Haver EML 200) mit Siebsätzen nach DIN ISO 3310-1 (2001) durchgeführt. Die Wägung der Siebsätze erfolgt durch eine Präzisionswaage (KERN 400-35N, Genauigkeit  $\pm 0.03 \text{ g}$ , Empfindlichkeit  $0.01 \text{ g}$ ). Die Darstellung der so ermittelten Werte erfolgt in einer Summenkurve. Außerdem wird der Fraktilwert bei 10 %, 50 % und 60 % Siebdurchgang sowie die Ungleichförmigkeit ( $U = d_{60}/d_{10}$ ) angegeben. Die Berechnung eines wirksamen Korndurchmessers  $d_w$  erfolgt nach der Methode von KOZENY (1927) anhand der folgenden Gleichung

$$\frac{1}{d_w} = \frac{\sum 1/d_j \cdot \Delta G_j}{\sum \Delta G_j} \quad (4.5)$$

mit dem Laufindex  $j$  der Kornklasse in den Grenzen  $d_o$  und  $d_u$ , dem Gewichtsanteil  $\Delta G_j$  der jeweiligen Kornklasse  $j$ , mit dem harmonischen Mittel aus der oberen und unteren Grenze der jeweiligen Kornklasse  $j$

$$\frac{1}{d_j} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_u} \right) \quad (4.6)$$

und dem Korndurchmesser  $d_o$  an der oberen Grenze einer Kornklasse und  $d_u$  an der unteren Grenze eine Kornklasse. Bei den ermittelten Sieblinien werden insgesamt 13 Kornklassen als

Stützstellen berücksichtigt (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 100 %-Siebdurchgang). Dabei werden die flachen Abschnitte der Siebkurven durch engere Punktabstände abgedeckt.

Der Filterfaktor  $F_g$  wird definiert als das Verhältnis vom Korndurchmesser  $d_{50}$  der Filterkies-schicht zum maßgebenden Korndurchmesser des Aquifermaterials  $d_{g,AM}$ .

$$F_g = \frac{d_{50}}{d_{g,AM}} \quad (4.7)$$

Für die Bestimmung des maßgebenden Korndurchmessers  $d_{g,AM}$  aus der Verteilungskurve der Siebdurchgänge wird der Mittelwert aus dem maximalen Korndurchmesser und dem nächst größeren Korndurchmesser gebildet (vgl. DVGW W 113, 2001).

Sämtliche Werte sind in Tabelle 4.4 aufgelistet, wobei diese Werte Mittelwerte aus Probenahmen der einzelnen Materialarten sind.

Tabelle 4.4: Mittelwerte einzelner geotechnischer Parameter der verschiedenen Materialien

Material	$d_w$ [mm]	$d_{10}$ [mm]	$d_{50}$ [mm]	$d_{60}$ [mm]	U [-]	Filterfaktor $F_g$
FK 0.7-1.4 mm	0.710	0.557	0.962	1.065	1.916	4.3
FK 0.7-1.4 mm DIN	0.764	0.752	1.169	1.244	1.653	5.2
FK 0.7-1.4 mm aL	0.708	0.612	1.056	1.159	1.893	4.7
FK 0.7-1.4 mm hU	0.447	0.297	0.663	0.763	2.568	2.9
FK 0.7-2.2 mm	1.308	0.841	1.581	1.744	2.074	7.0
FK 1.0-2.0 mm	1.482	1.119	1.576	1.702	1.521	7.0
FK 1.4-2.2 mm	1.672	1.309	1.775	1.866	1.429	7.9
FK 2.0-3.15 mm	2.499	1.977	2.599	2.742	1.389	11.6
GK 1.25-1.65 mm	1.432	1.288	1.440	1.478	1.148	6.4
Aquifermaterial	0.222	0.171	0.238	0.249	1.457	-

## 4.7 Modelleffekte

Aufgrund des Modellmaßstabes von 1:1 sind bei dieser Untersuchung keine Maßstabeffekte zu berücksichtigen. Die Nachbildung des Brunnens als zylindrisches Modell ohne seitliche Anschlüsse an eine Berandung des Versuchsbehälters schließt Wandeffekte aus und sichert die vollständig radiale Anströmung zum Versuchsbehältermittelpunkt. Durch die gespannten Verhältnisse infolge des Überdrucks wird eine gleichmäßige Durchströmung der Brunnenscheibe über die gesamte Höhe des Versuchsvolumens gewährleistet. Mögliche Umläufigkeiten am Deckel und Behälterboden werden durch eine Deckeldichtung aus Zellkautschuk und gut verdichtetes Material verhindert. Auch die Filterrohre sind an beiden Enden mit einer

Dichtungsschicht aus Zellkautschuk versehen. Es werden umfangreiche Maßnahmen zur Sicherstellung konstant bleibender Versuchsrandbedingungen durchgeführt, wie die Bestimmung der jeweils erzielten Lagerungsdichte, die Bestimmung der Korngrößenverteilung des eingebauten Materials und die Beibehaltung der stets gleichen Einbauprozedur.

Der betrachtete Brunnenausschnitt hat eine Höhe von 0.5 m, welche für die Untersuchung gespannter Verhältnisse ausreichend ist, da hierbei keine vertikalen Fließgeschwindigkeiten auftreten. Die Filterrohrlänge im Modell mit 0.5 m stellt im Vergleich zu einer typischen Rohrlänge von 6 m bis 12 m einen verkürzten vertikalen Ausschnitt dar. Es wird aufgrund der gespannten Verhältnisse nur die horizontale Strömungskomponente berücksichtigt. Der Temperatureinfluss wird durch die Normierung der kinematischen Viskosität auf eine Vergleichstemperatur von 10 °C rechnerisch eliminiert. Da das Wasser im Modellversuch im Kreislauf ohne eine Zwischenfiltration gepumpt wird, besteht die Möglichkeit, dass sich Feinstpartikel im durchströmten Material ablagern können. Zur äußeren Stabilisierung des eingebauten Aquifermaterials wird ein Metallochblech mit einem feinen Metallvlies verwendet. Durch das Metallvlies wird außerdem sichergestellt, dass eine gleichmäßige Anströmung über die gesamte Mantelfläche stattfindet. Der zusätzliche Strömungswiderstand aufgrund des Metallvlieses ist vernachlässigbar.

Aufgrund des verwendeten Dreieckwehres nach THOMSON zur Durchflussmessung ist zwar der Maximaldurchfluss der Anlage mit der größtmöglichen Überdruckhöhe von 380 cm auf 5 l/s begrenzt. Insgesamt ist jedoch ein Geschwindigkeitsbereich für die Filterrohreintrittsgeschwindigkeit von 0.04 cm/s bis 0.77 cm/s realisierbar, welcher die mittlere Filterrohreintrittsgeschwindigkeit im Tagebau von 0.1 cm/s bis 0.2 cm/s abdeckt. Durch die Verwendung des Aquifermaterials aus dem Tagebau Garzweiler und der Standardfilterkiese sowie der Standardfilterrohre zur Tagebauentwässerung sind keine Modelleffekte aufgrund künstlicher Materialien bei der Übertragung der Modellergebnisse auf die natürlichen Verhältnisse im Tagebau zu berücksichtigen. Die gewählten Modellabmessungen beschränken die möglichen Bohrlochgrößen auf die beiden kleineren Ausbaudurchmesser BL 550 und BL 860. Weiterhin ist die maximal mögliche Einbaudicke des Aquifermaterials durch die Modellabmessungen auf 500 mm in radialer Richtung begrenzt. Eine ausführliche Diskussion dieses Modelleffektes unter Berücksichtigung der Messergebnisse folgt in Kapitel 4.7.3. Zusammenfassend sind in der Tabelle 4.5 die Randbedingungen des Modellversuches denen im Tagebau gegenübergestellt.

Tabelle 4.5: Darstellung Randbedingungen im Modellversuch und Verhältnisse im Tagebau

Randbedingung	Modellversuch	Tagebau
Horizontaler Ausdehnung GW	200 bis 500 mm	Annahme: unendlich
Schüttmaterial	Filterkies, Glaskugeln	Bemessung Filterkies mit $F_g$ 4.5
Aquifermaterial (AM)	Garzweiler: Horizont 6b	Anstehendes Gebirge im Tagebau
Filterrohr	WDF, SF; KLF, KSF, SBF	WDF, SF, KLF, KSF, SBF
Filterrohrlänge	0.5 m	6 m bis 12 m
Eintrittsgeschwindigkeit FR	$v_f = 0.04$ bis $0.77$ cm/s	mittlerer Bereich $v_f = 0.1$ bis $0.2$ cm/s
Fließverhältnisse	gespannt	gespannt und ungespannt
Strömungszustand	stationär	stationär und instationär
Bohrlochgröße	BL 550, BL 860	BL 550, BL 860, BL 1200, BL 1500
Filterrohrdurchmesser	DN 300, DN 400	DN 300, DN 400, DN 500, DN 750
Anströmungsart	radial	radial im Brunnennahbereich
Maßstab	1	1
Lagerungsdichte AM 6b	$1.58$ t/m <sup>3</sup>	$1.6$ t/m <sup>3</sup>
Porosität AM 6b	0.406	0.424
Wassertemperatur	$23$ °C bis $31$ °C	Garzweiler: $12$ °C bis $18$ °C

#### 4.7.1 Sicherstellung gleichbleibender Versuchsrandbedingungen

Zum Nachweis gleichbleibender Versuchsrandbedingungen wird die Versuchskonfiguration mit einem Kieslochfilterrohr 3-5 mm bei einer 0.7-1.4 mm Verkiesung und einer Aquifermaterialsichtdicke von 200 mm zu Beginn fünffach mit jeweils neuem Einbau wiederholt. Die Ergebnisse zur Lagerungsdichte dieser Reihenversuche zeigen für das Aquifermaterial bei einem arithmetischen Mittelwert von  $\rho_{LD} = 1.55$  t/m<sup>3</sup> eine empirische Standardabweichung von 2.9 % und für den Filterkies bei einem arithmetischen Mittelwert der Lagerungsdichte von  $\rho_{LD} = 1.63$  t/m<sup>3</sup> eine empirische Standardabweichung von 1.3 %.

Die Erfahrungen aus vergleichbaren Untersuchungen zeigen, dass beim Einbau des porösen Materials sehr sorgfältig gearbeitet werden muss, um eine möglichst gleichbleibende Packungsstruktur zu erhalten. NAHRGANG (1965) berichtet, dass es ihm trotzdem nicht möglich ist, die Ergiebigkeiten der einzelnen Versuche miteinander zu vergleichen, weil die Ergebnisse stark streuen. Auch von LEHMANN (1968) werden nur qualitative Vergleiche der Ergiebigkeiten bei Modellversuchen mit jeweils neu eingebautem Aquifermaterial zur Untersuchung der Sickerstrecke durchgeführt. Häufig wird daher bei experimentellen Untersuchungen das Aquifermaterial nicht ausgetauscht, um die Porenstruktur nicht zu verändern. Dadurch muss jedoch ein Trennblech zwischen dem Aquifermaterial und dem Filterkies als Festinstallation

mit einem zusätzlichen Verlust und einer möglichen Beeinflussung der Trennfläche vorgesehen werden (WALDE, 1966). Um den Festeinbau eines solchen Trennbleches an der Grenzfläche Aquifermaterial/Filterkies zu vermeiden, wird die in Kapitel 4.6.1 beschriebene systematische Einbauprozedur verwendet, mit welcher gleichbleibende Versuchsrandbedingungen eingehalten werden.

Die im Reihenversuch ermittelten Druckverluste, welche durch den Brunnenausbau bestehend aus Filterrohr und Filterkies hervorgerufen werden, sind in Abbildung 4.11 in Abhängigkeit von den unterschiedlich eingestellten Durchflusswerten dargestellt. Die Abbildung 4.12 enthält die gemessenen Druckverluste im Aquifermaterial. Die Werte für den Versuch 5 liegen etwas oberhalb der anderen Werte. Bei diesem Versuch wurde die größte Lagerungsdichte der 5 Versuche mit  $1.62 \text{ t/m}^3$  erreicht. Bei Annahme einer linearen Regression zeigen die fünf Reproduktionsversuche ein Bestimmtheitsmaß von 0.99 für den Druckverlust des Brunnenausbaus und 0.98 für den Druckverlust des Aquifermaterials. Anhand der Ergebnisse dieser Reihenversuche ist nachgewiesen, dass durch die systematische Einbauprozedur gleichbleibende Versuchsrandbedingungen bezüglich des Widerstandsverhaltens sichergestellt sind.

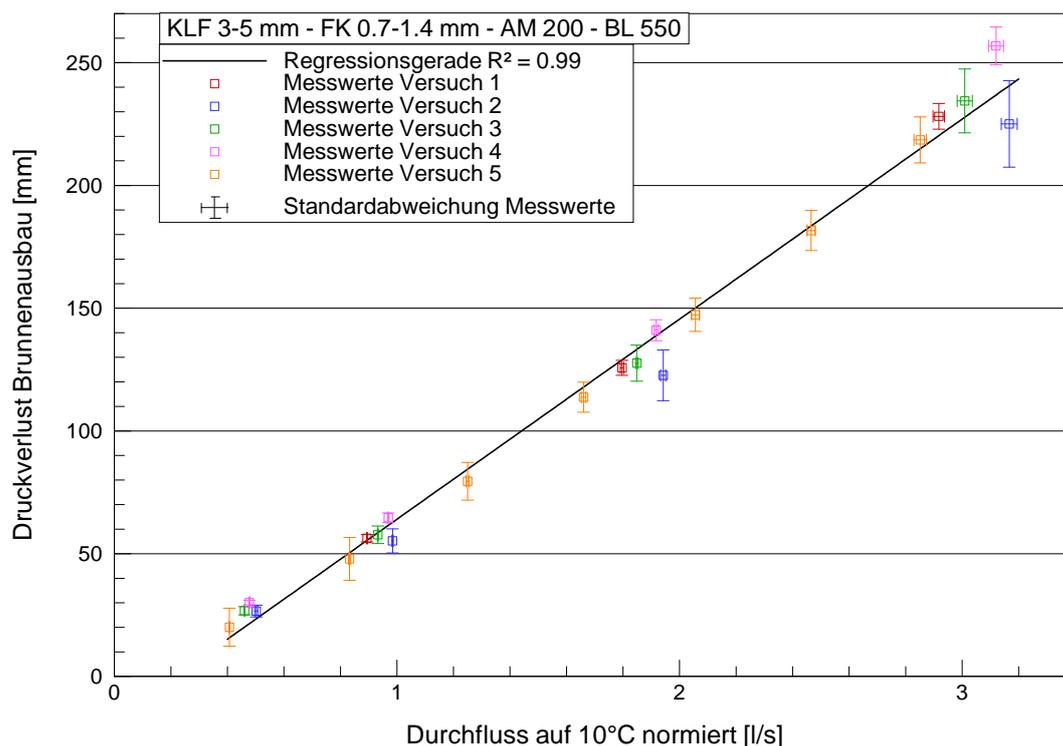


Abbildung 4.11: Ergebnisse der fünf Reihenversuche mit linearer Regressionsgerade für den Druckverlust des Brunnenausbauwiderstands in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss

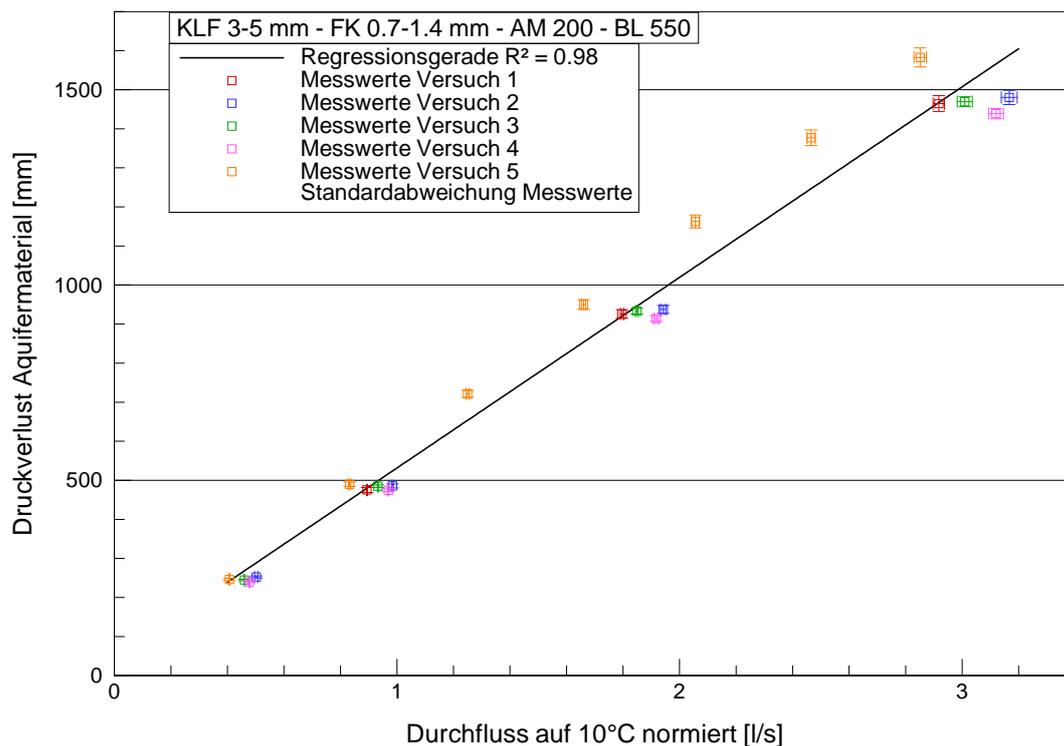


Abbildung 4.12: Ergebnisse der fünf Reihenversuche mit linearer Regressionsgerade für den Druckverlust im Aquifermaterial in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss

#### 4.7.2 Untersuchung des Materialverhaltens bei Durchflusssteigerung

Durch zwei weitere Wiederholungsversuche wird außerdem untersucht, ob die Reihenfolge der Durchflusssteigerung zu einem zyklischen Verhalten im Aquifermaterial führt. Die Wiederholungsversuche werden jeweils mit drei Messzyklen gefahren. Zunächst wird der Durchfluss stufenweise bis zum Maximum gesteigert (Zyklus 1), danach wird der Durchfluss graduell wieder bis zum Minimum reduziert (Zyklus 2), um abschließend den Durchfluss noch einmal stufenweise bis zum Maximum zu steigern (Zyklus 3). Anhand der Versuchsergebnisse in Abbildung 4.13 ist eindeutig zu erkennen, dass kein vom Durchfluss abhängiges zyklisches Verhalten im Aquifermaterial vorliegt. Die Geraden sind nahezu deckungsgleich.

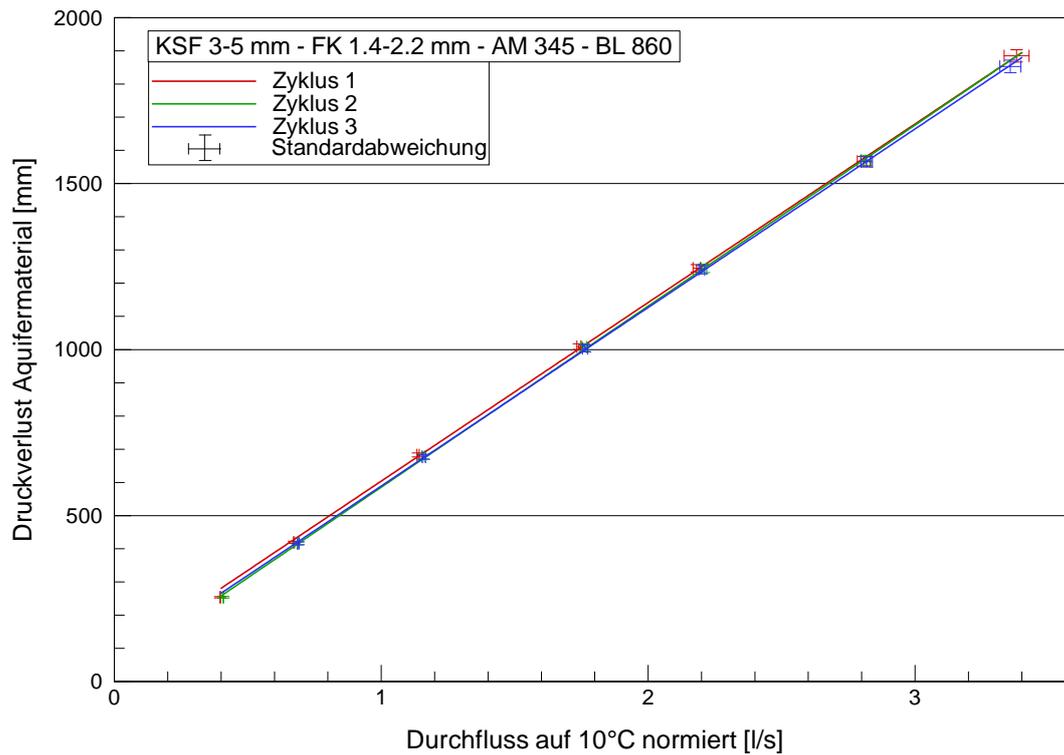


Abbildung 4.13: Druckverlust im Aquifermaterial in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für drei Messzyklen beim Wiederholungsversuch mit Kiesstabfilter DN 400 und einer 1.4-2.2 mm Verkiesung bei einer Aquifermaterialsichtdicke von 345 mm

#### 4.7.3 Einfluss der Aquifermaterialsichtdicke auf den Brunnenausbauwiderstand

Im Modellkonzept wird der Grundwasserleiter durch eine radial begrenzte Schicht des umgebenden Aquifermaterials (AM) abgebildet. Im Vergleich dazu wird bei den DUPUIT-Annahmen (siehe Kapitel 3.3.1) von einem radial unendlich ausgedehnten Grundwasserleiter ausgegangen. Welchen Einfluss diese Vereinfachung auf die Modellergebnisse und ihre Vergleichbarkeit für unterschiedliche Geometrien hat, wird durch eine systematische Variation der Aquifermaterialsichtdicke untersucht. Hierfür stehen für einen Bohrllochdurchmesser von 550 mm folgende Einbaudicken des Aquifermaterials aufgrund der Druckmessstellenanordnung (siehe Abbildung 4.7) in der Versuchsanlage zur Verfügung:

- 200 mm
- 355 mm
- 500 mm

Anhand zweier Versuchsserien zu den drei Einbaudicken mit jeweils gleichbleibendem Filterrohr wird der Einfluss der Aquifermaterialsichtdicke auf das Widerstandsverhalten des Brunnenausbaus untersucht. Als Filterrohre wird zum Einen ein Kiesstabfilter (3-5 mm Kiesbeklebung) und zum Anderen ein Scheibenfilter (Spaltweite 1.0 mm) verwendet.

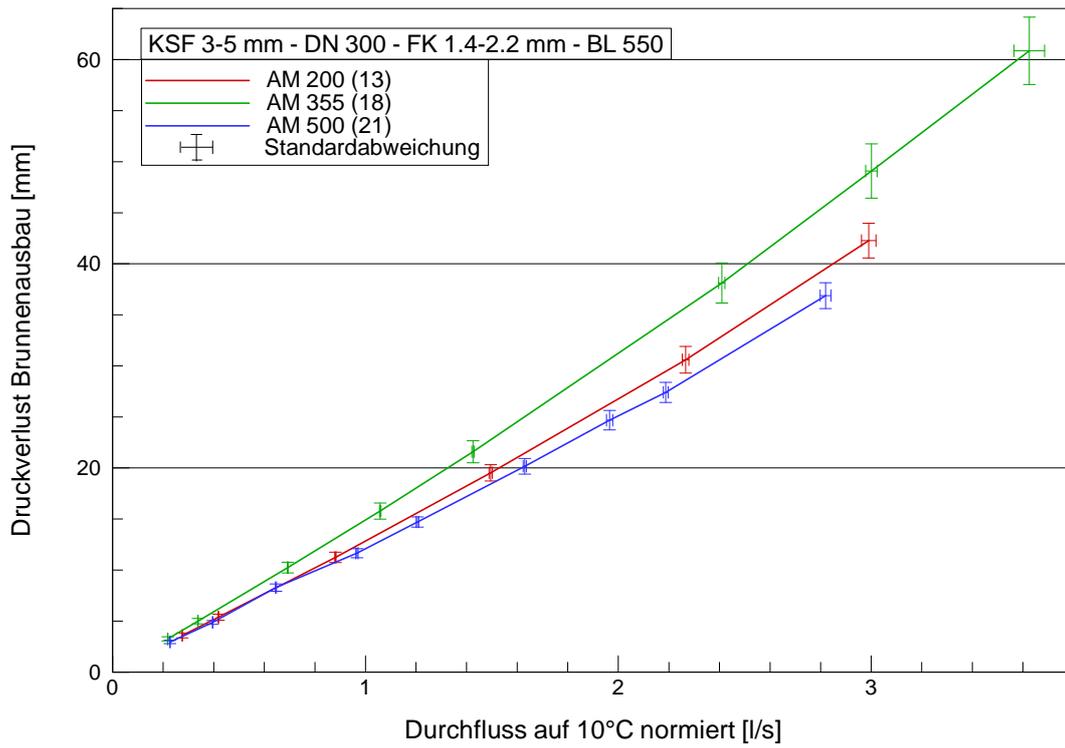


Abbildung 4.14: Druckverlust des Brunnenausbaus dargestellt in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für den Kiesstabfilter bei drei verschiedenen Aquifermaterialsichtdicken

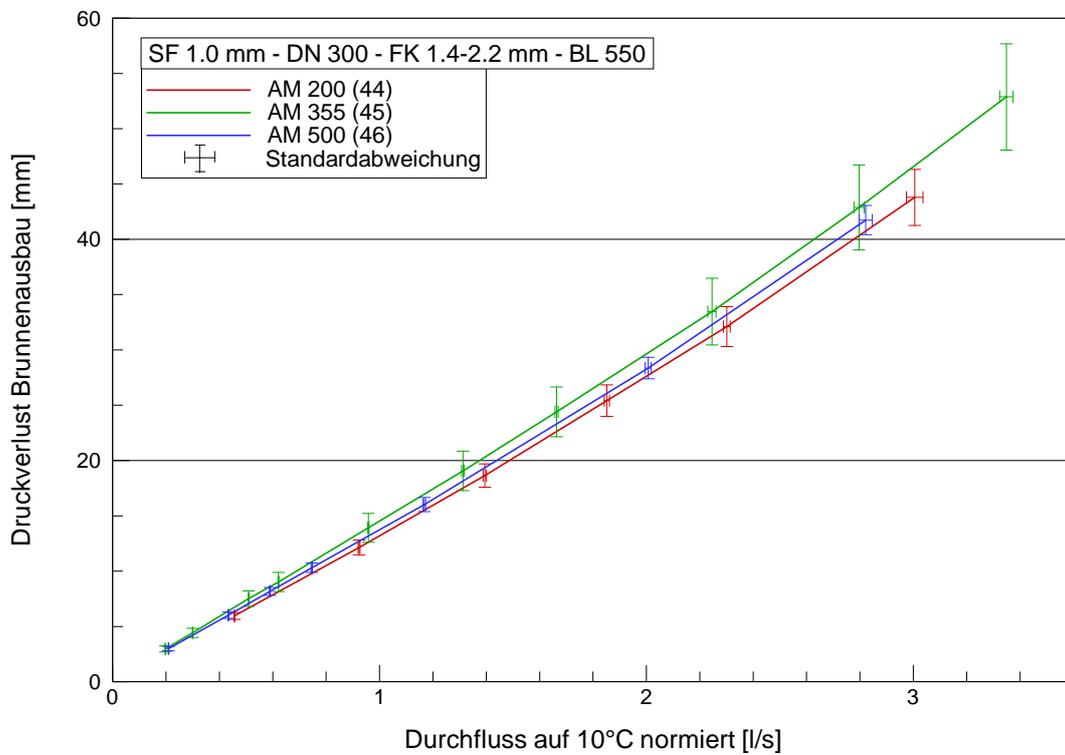


Abbildung 4.15: Druckverlust des Brunnenausbaus dargestellt in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für den Scheibenfilter bei drei verschiedenen Aquifermaterialsichtdicken

Die Auswertung der Versuche in Abbildung 4.14 zeigt, dass die Bandbreite für den Brunnenausbauwiderstand der drei Aquifermaterialsichtdicken beim Kiesstabfilter im Vergleich zum Scheibenfilter (Abbildung 4.15) größer ist, obwohl bei jeweils drei Versuchen das gleiche Filterrohr verwendet und bei allen Versuchen die gleiche Filterkieskörnung 1.4-2.2 mm eingebaut wird. Den größten Druckverlust beim Kiesstabfilter (Abbildung 4.14) weist der Versuch mit 355 mm Schichtdicke auf, während der Versuch mit 500 mm Schichtdicke den geringsten Druckverlust liefert und der Versuch mit 200 mm Schichtdicke dazwischen liegt. Dies ist abweichend von der Reihenfolge der Schichtdicken, aber identisch mit der Reihenfolge der Lagerungsdichten des Filterkieses. Im Vergleich erzielt der Versuch mit der Aquifermaterialsichtdicke von 355 mm die größte Lagerungsdichte ( $1.64 \text{ t/m}^3$ ), während der Versuch mit der Schichtdicke von 500 mm die kleinste Lagerungsdichte ( $1.58 \text{ t/m}^3$ ) aufweist. Somit beeinflusst die Lagerungsdichte den Brunnenausbauwiderstand, wobei der Einfluss als gering anzusehen ist, da die Bandbreite der Abweichungen unter 10 mm liegt. Beim Scheibenfilter (Abbildung 4.15) liegen die Kurven deutlich dichter zusammen. Die erzielten Lagerungsdichten liegen für diese drei Versuche auch mit  $1.59 \text{ t/m}^3$  bis  $1.61 \text{ t/m}^3$  in einer engeren Bandbreite.

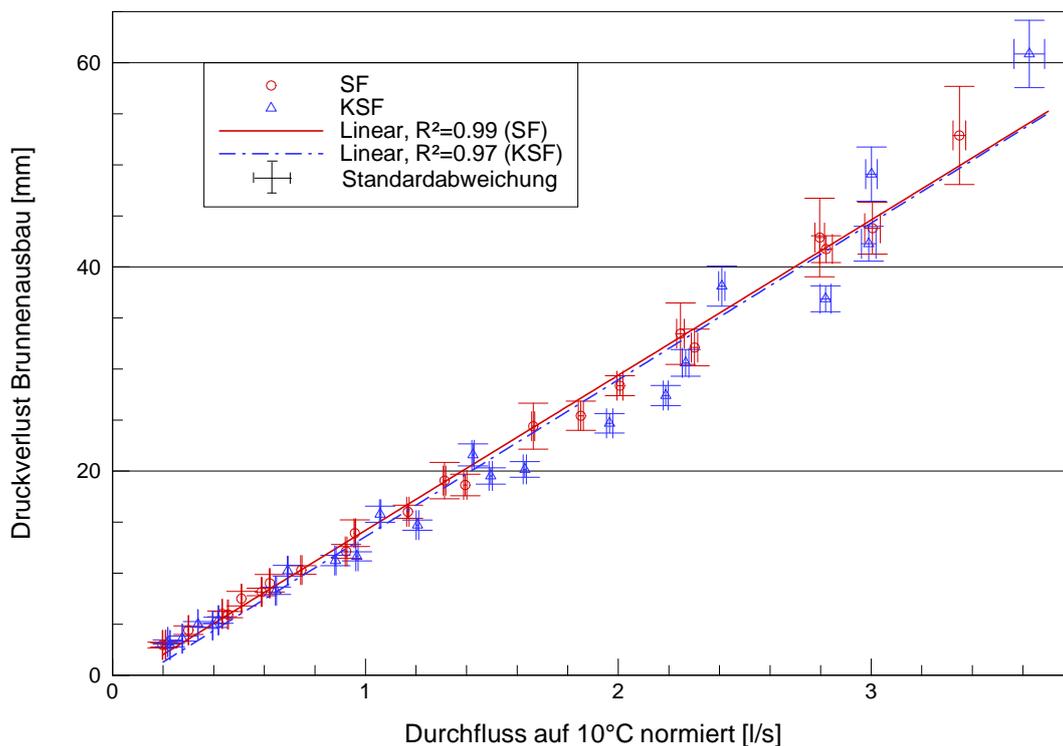


Abbildung 4.16: Lineare Regressionsgeraden zwischen Druckverlust Brunnenausbau und normiertem Durchfluss für Kiesstabfilter mit Kiesbekleidung 3-5 mm sowie Scheibenfilter mit Spaltweite 1.0 mm, jeweils mit 1.4-2.2 mm Verkiesung bei drei verschiedenen Aquifermaterialsichtdicken

Die Regressionsanalyse, dargestellt in Abbildung 4.16 für beide Filterrohrtypen, zeigt bei Verwendung einer linearen Funktion ein Bestimmtheitsmaß von 0.97 für die drei Kiesstabfilterversuche und 0.99 für die drei Scheibenfilterversuche. Die Darstellung der beiden Regressionsfunktionen in Abbildung 4.16 zeigt einen nahezu identischen Verlauf. Da eine Veränderung der Schichtdicke somit keinen signifikanten Einfluss auf den Brunnenausbauwiderstand hat, ist dieser Modelleffekt im Vergleich zur Annahme eines unendlich ausgedehnten Aquifers für den Ausbauwiderstand als vernachlässigbar anzusehen. Die verwendete Schichtdicke für das Aquifermaterial ist deshalb ausreichend für die vorliegenden Fragestellungen.

## 4.8 Untersuchungsprogramm

Insgesamt werden 64 Einzelversuche mit dem Brunnenfiltermodell durchgeführt, welche nach unterschiedlichen Fragestellungen in verschiedene Blöcke eingeteilt sind (vgl. Tabelle 4.6). Manche Versuchsergebnisse werden für die Auswertung mehrerer Fragestellungen verwendet.

Tabelle 4.6: Übersicht der einzelnen Versuchsblöcke mit jeweiliger Fragestellung, verwendeten Filterrohren und Filterkiesen

Block	Fragestellung	Filterrohr	Filterkies
1	Durchlässigkeit Filterrohr	WDF, SF, KLF, KSF, SBF	Ohne
2	Einfluss Unterkorngehalt	KLF	0.7-1.4 mm
3	Einfluss Ungleichförmigkeit und Kornform Filterkies	KLF	0.7-1.4 mm 0.7-2.2 mm 1.4-2.2 mm GK
4	Einfluss Korngruppe	KLF, KSF, SF, WDF	0.7-1.4 mm 1.0-2.0 mm 1.4-2.2 mm 2.0-3.15 mm
5	Einfluss Filterrohröffnungsweite	SF, WDF	1.4-2.2 mm
6	Einfluss Filterrohröffnungsform	SF, WDF, SBF	1.4-2.2 mm
7	Einfluss Kiesbeklebung	KSF, KLF, SBF	1.4-2.2 mm
8	Einfluss Filterrohrtyp	KSF, KLF, SF, WDF, SBF	1.4-2.2 mm

Der erste Block umfasst die Untersuchung der einzelnen Filterrohre, welche ohne Filterkies und Aquifermaterial im Versuchsbehälter durchströmt werden. Anhand der ermittelten Druckverluste wird die Durchlässigkeit der einzelnen Filterrohre abgeleitet. Die Untersuchung verschiedener Eigenschaften des Filterkieses wird in den Blöcken 2 bis 4 durchgeführt. Neben dem Einfluss des Unterkorngehalts werden verschiedene Kornformen und Ungleich-

förmigkeiten sowie der Einfluss unterschiedlicher Korngruppen auf den Brunnenausbauwiderstand untersucht. Die Eigenschaften des Filterrohres bilden den Untersuchungsschwerpunkt der Blöcke 5 bis 8. Die Filterrohröffnungsweite (Block 5) und die Form der Filterrohröffnung (Block 6) sowie die Kiesbekleidung (Block 7) werden variiert und der Einfluss dieser Variationen auf den Brunnenausbauwiderstand bewertet. Die Untersuchung des Filterrohrtypeneinflusses erfolgt in Block 8. Eine Übersicht der verschiedenen Einbaukonfigurationen aller Versuche mit kiesbeklebten Filterrohren enthält Tabelle 4.7. Tabelle 4.8 zeigt die Versuchskonfiguration für Versuche mit Filterrohren ohne Kiesbekleidung. Bei allen Abbildungen im folgenden Kapitel wird die Versuchskonfiguration in der Legende aufgeführt und die Nummern entsprechend den Versuchskonfigurationen nach Tabelle 4.7 und Tabelle 4.8 jeweils in Klammern angegeben. Die Skalierung der y-Achse ist an den maximal erreichten Druckverlust angepasst und daher nicht für alle Abbildungen einheitlich.

Tabelle 4.7: Versuchskonfigurationen der kiesbeklebten Filterrohre

Nr	Filterrohr	Kiesbekleidung		AM-Dicke [mm]				BL [mm]		Filterkies [mm]					DN [mm]			
		3-5 mm	4-7 mm	0	200	345	355	500	550	860	0.7-1.4	1.4-2.2	2.0-3.15	0.7-2.2	1.0-2.0	GK	300	400
1	KLF	x		x					x									x
2	KLF	x			x				x		x							x
3	KLF	x			x				x		x							x
4	KLF	x			x				x		x							x
5	KLF	x			x				x		x							x
6	KLF	x			x				x			x						x
7	KLF	x			x				x				x					x
8	KLF		x	x					x									x
9	KLF		x		x				x			x						x
10	KLF		x		x				x				x					x
11	KSF	x		x					x									x
12	KSF	x			x				x		x							x
13	KSF	x			x				x			x						x
14	KSF	x			x				x				x					x
15	KSF	x			x				x					x				x
16	KSF	x			x				x							x		x
17	KSF	x					x		x		x							x
18	KSF	x					x		x			x						x
19,20	KSF	x				2x			x			x						x
21	KSF	x						x	x			x						x
22	KSF	x		x					x									x
23,24	KSF	x				2x			x			x						x
25	KSF	x					x		x							x		x
26	KSF		x	x					x									x
27	KSF		x		x				x			x						x
28	KSF		x		x				x				x					x
29	KSF		Hobas	x					x									x
30	KSF		Hobas	x					x			x						x
31	SBF	x		x					x									x
32	SBF	x			x				x			x						x
33	SBF	x			x				x				x					x
34	SBF		x	x					x									x
35	SBF		x		x				x			x						x
36	SBF		x		x				x				x					x



## 5 Phänomenologische Beschreibung der Prozesse im Brunnennahbereich

### 5.1 Vorbemerkungen

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der Brunnenfiltermodellversuche unter gespannten Verhältnissen phänomenologisch ohne Zuhilfenahme von analytischen Modellen und Theorien beschrieben. Das bedeutet, die Ergebnisse der einzelnen Versuche werden entsprechend der unterschiedlichen Fragestellungen im Vergleich zueinander bewertet und erste Aussagen bezüglich des Einflusses verschiedener Parameter auf die Strömungsprozesse im Brunnennahbereich getroffen. Die Ableitung von theoretischen Modellen zur Erklärung der Phänomene und zur mathematischen Beschreibung der Prozesse wird im nächsten Kapitel vorgenommen.

### 5.2 Untersuchung der Filterrohrdurchlässigkeit

Im ersten Untersuchungsblock werden alle verwendeten Filterrohre in den nur mit Wasser gefüllten Versuchsbehälter gestellt und ihr Widerstandsverhalten bei verschiedenen Durchflüssen untersucht. Die Auswertung dieser Versuche zeigt Abbildung 5.1 für alle Filterrohre mit Kiesbeklebung und Abbildung 5.2 für alle nichtbeklebten Filterrohre. Der gemessene Druckverlust wird als Gradient bezogen auf die jeweilige Filterrohrwandstärke in Abhängigkeit von der Eintrittsgeschwindigkeit an der Filterrohrinnenseite dargestellt.

Die Kieslochfilter und Wickeldrahtfilter zeigen, bezogen auf die Filterrohrwanddicke, die größten Druckverluste. Auch der Schlitzbrückenfilter ohne Kiesbeklebung verursacht deutlich höhere Druckverluste, während die Scheibenfilter und die Kiesstabfilter die geringsten Druckverluste aufweisen. Die beiden größeren Filterrohre mit DN 400 mm zeigen höhere Druckverluste als ihr jeweiliges Pendant mit DN 300 mm. Die gröbere Kiesbeklebung der Filterrohre mit 4-7 mm zeichnet sich durch reduzierte Druckverluste im Vergleich zur Kiesbeklebung mit 3-5 mm aus. Die Spaltweite beim Wickeldrahtfilter zeigt keinen Einfluss auf den Druckverlust.

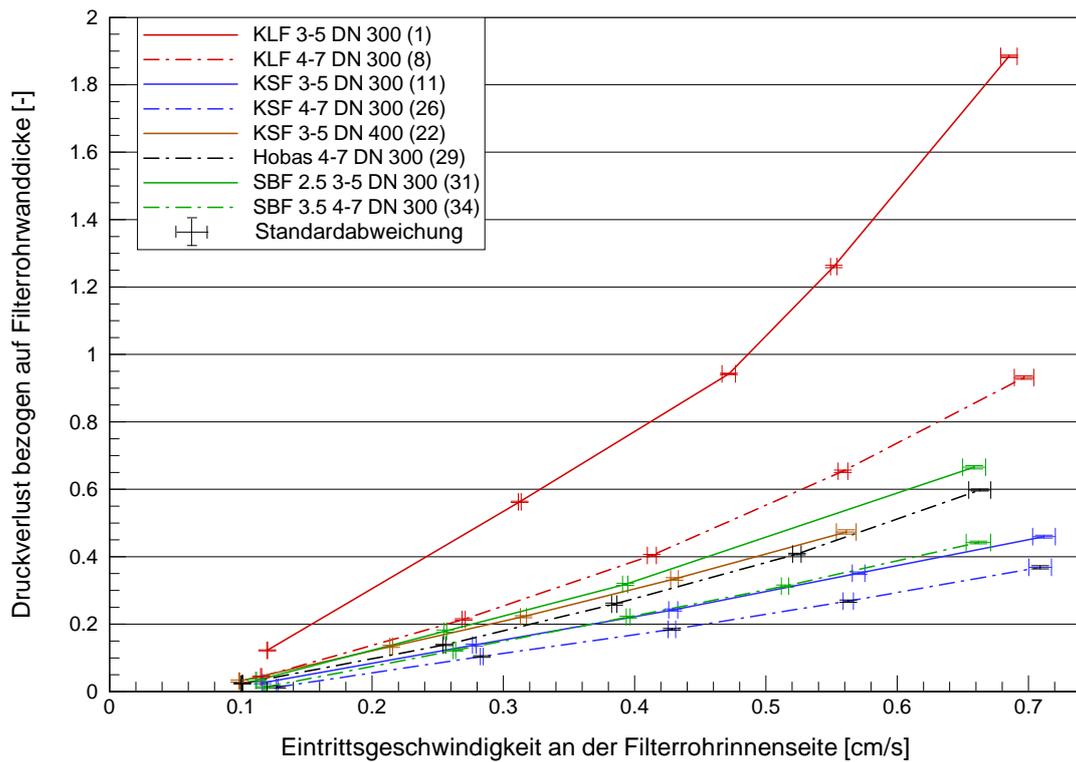


Abbildung 5.1: Druckverlust (bezogen auf Filterrohrwanddicke) in Abhängigkeit von der Eintrittsgeschwindigkeit an der Filterrohrinnenseite für alle Filterrohre mit Kiesbeklebung

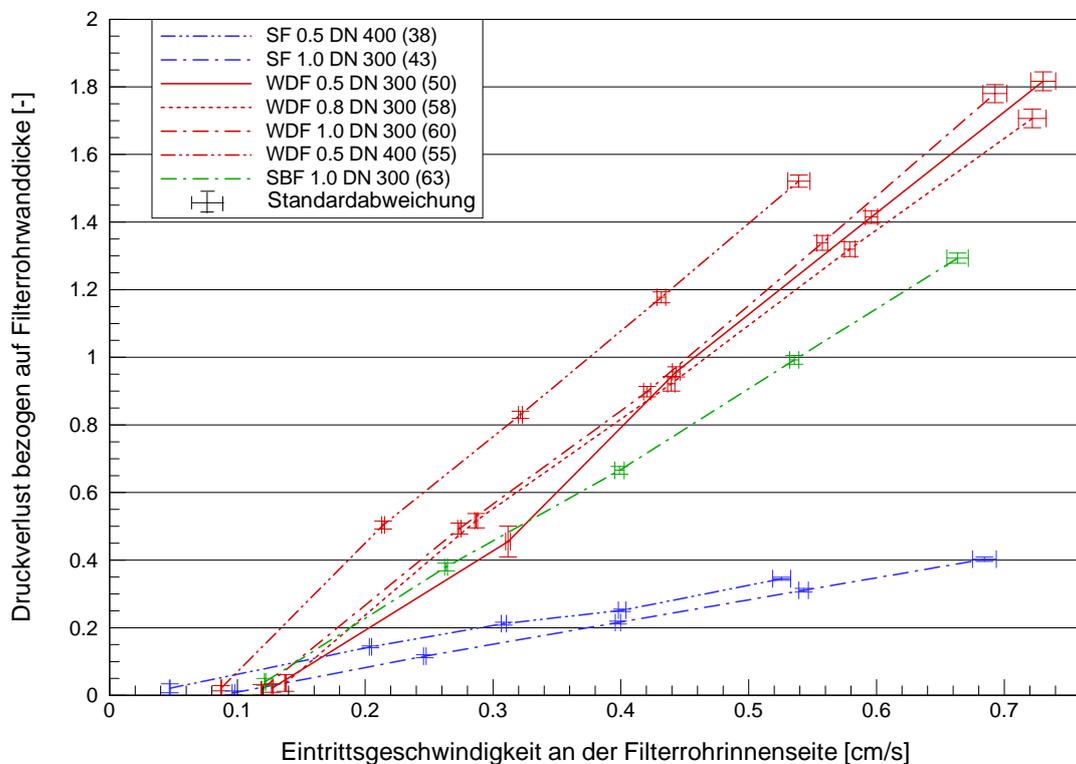


Abbildung 5.2: Druckverlust (bezogen auf Filterrohrwanddicke) in Abhängigkeit von der Eintrittsgeschwindigkeit an der Filterrohrinnenseite für alle Filterrohre ohne Kiesbeklebung

### 5.3 Einfluss des Filterkieses auf den Brunnenausbauwiderstand

In Untersuchungsblock 2 bis 4 werden insgesamt neun verschiedene Filterkiese für den Brunnenausbau untersucht, deren Korngrößenverteilungen in Abbildung 4.5 dargestellt sind. Nach den Einbaubestimmungen der RWE Power AG wird bei dem vorliegenden Aquifermaterial eine Kieskörnung der Klasse 0.7-1.4 mm eingebaut. Dieser Filterkies wird daher in der vorliegenden Arbeit als Standardfilterkies bezeichnet. Der Einfluss verschiedener Parameter auf den Brunnenausbauwiderstand wird nachfolgend vorgestellt.

#### 5.3.1 Einfluss des Unterkorngehaltes

Es werden vier Versuche jeweils mit demselben Filterrohr (Kieslochfilter mit 3-5 mm Kiesbeklebung) und der gleichen Korngruppe (Filterkies 0.7-1.4 mm) durchgeführt, bei denen nur der Unterkorngehalt des Filterkieses variiert wird. Neben einem Kies mit einem Unterkornanteil nach DIN 4924 (1998) wird ein Filterkies aus einer anderen Lagerstätte und ein Filterkies mit einem hohen Unterkornanteil im Vergleich zum Standardfilterkies der Klasse 0.7-1.4 mm verwendet. Nach DIN 4924 (1998) wird für einen Filterkies 0.7-1.4 mm der maximale Unterkornanteil auf 10 % begrenzt. Der Unterkornanteil der verwendeten Filterkiese lässt sich aus der Abbildung 4.5 ablesen mit:

- 8 % für den Filterkies nach DIN 4924 (1998)
- 16 % für den Filterkies aus der anderen Lagerstätte (aL)
- 33 % für den Standardfilterkies
- 54 % für den Filterkies mit erhöhtem Unterkornanteil (hU)

Diese Reihenfolge wird durch die Versuchsergebnisse in Abbildung 5.3 bestätigt. Der Versuch mit dem DIN-Kies zeigt im Vergleich den geringsten Druckverlust dieser vier Varianten, während der Versuch mit dem hohen Unterkornanteil den größten Druckverlust erzielt. Auch der Filterkies aus einer anderen Lagerstätte führt zu geringeren Druckverlusten als der Standardfilterkies. Somit ist ersichtlich, dass der Unterkorngehalt einen Einfluss auf das Durchströmen der Filterkiesschicht und den dabei produzierten Druckverlust hat.

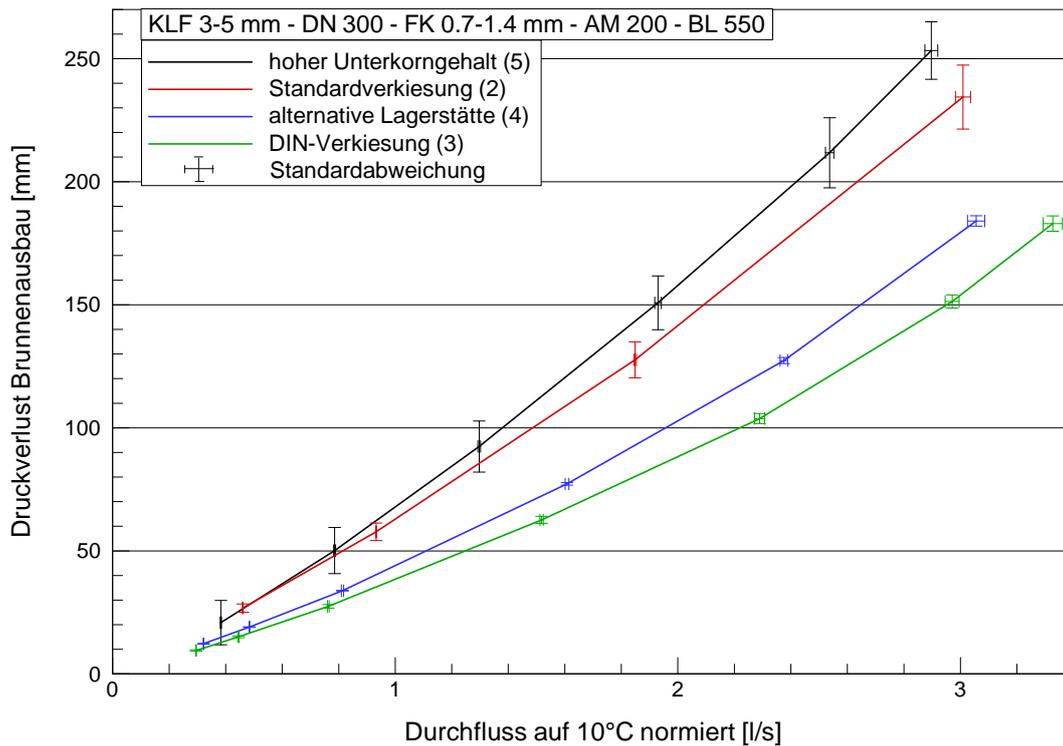


Abbildung 5.3: Druckverlust des Brunnenausbau mit Kieslochfilter und FK 0.7-1.4 mm in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für vier verschiedene Unterkorngesamte

### 5.3.2 Einfluss der Ungleichförmigkeit und der Kornform

Den Einfluss eines weit gestuften und dadurch ungleichförmigeren Filterkieses mit 0.7-2.2 mm (Versuch Nr. 15) im Vergleich zum Filterkies mit 1.4-2.2 mm (Versuch Nr. 13) und zur Standardverkiebung (Versuch Nr. 12) zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Kiesstabfilter (Kiesbeklebung 3-5 mm) in Abbildung 5.4.

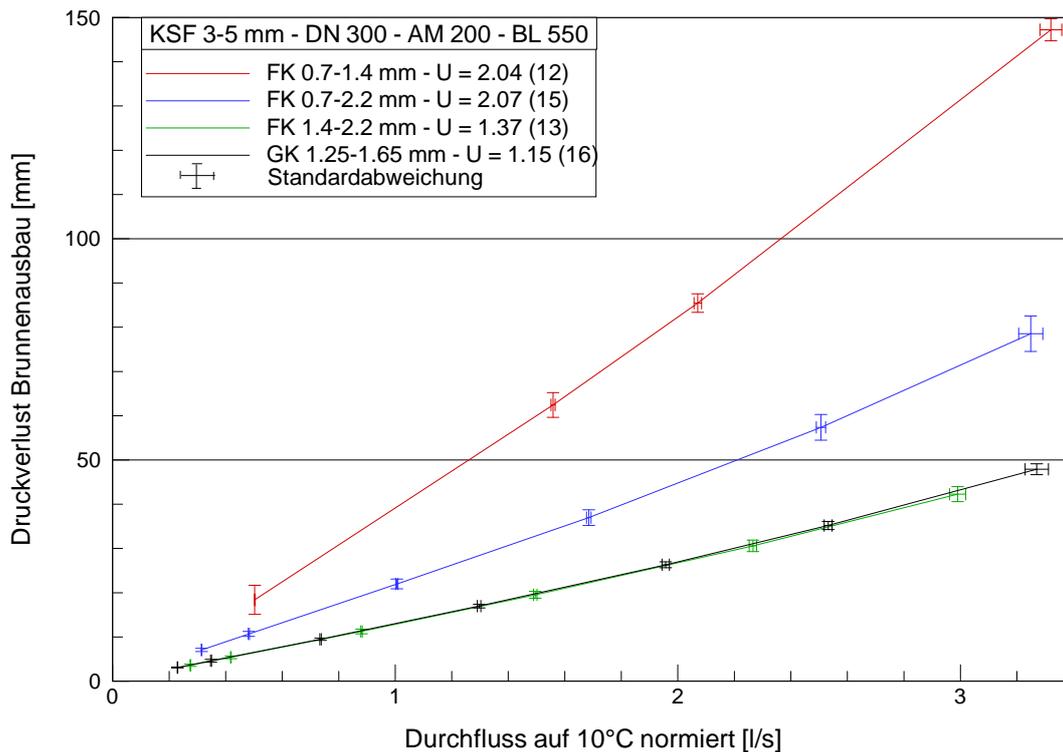


Abbildung 5.4: Druckverlust des Brunnenbaus mit Kiesstabfilter und vier verschiedenen Filterkiesen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss zur Variation der Ungleichförmigkeit  $U$  und der Kornform

Die Standardverkiesung führt zu den größten Druckverlusten, während der Filterkies 1.4-2.2 mm die geringsten Druckverluste hervorruft. Zwischen diesen beiden Filterkiesen liegt der Versuch mit der weit gestuften Verkiesung 0.7-2.2 mm. Aufgrund des großen Unterkornanteils weist die Standardverkiesung auch eine große Ungleichförmigkeit von 2.04 auf, welche fast identisch mit der Ungleichförmigkeit von 2.07 der weit gestuften Verkiesung ist. Daraus lässt sich folgern, dass bei gleicher Ungleichförmigkeit der feinere Filterkies zu erhöhten Druckverlusten führt und der Filterkies mit größeren Anteilen die Druckverluste reduziert.

Zudem wird die Kornform durch den Einsatz von Glaskugeln als Alternative zum Filterkies variiert. Die schwarzen Symbole in Abbildung 5.4 sind das Ergebnis der Untersuchung mit Glaskugeln (Versuch Nr. 16), welche ein identisches Ergebnis wie die Verkiesung mit 1.4-2.2 mm (Versuch Nr. 13) zeigen. Da die Glaskugeln mit 1.25-1.65 mm im Vergleich zum Filterkies 1.4-2.2 mm eine geringere Korngröße aufweisen, kann der identische Brunnenbauwiderstand durch die strömungsgünstige Form der Kugeln begründet werden.

### 5.3.3 Einfluss der Korngruppe

Der Einfluss der Korngruppenwahl auf den Brunnenbauwiderstand wird durch eine umfangreiche Variation der Korngruppen untersucht. Neben der bisher verwendeten Standard-

verkiesung mit 0.7-1.4 mm werden zwei gröbere Verkiesungen mit 1.4-2.2 mm und 2.0-3.15 mm untersucht (siehe Tabelle 4.4). Auch eine weit gestufte Verkiesung mit 0.7-2.2 mm sowie eine andere Abstufung mit 1.0-2.0 mm werden getestet.

Die Abbildung 5.5 enthält die Ergebnisse der Versuche mit einem Kieslochfilter und drei verschiedenen Filterkiesen. Die Standardverkiesung (Versuch Nr. 2) zeigt deutlich erhöhte Druckverluste für den Brunnenausbau im Vergleich zu den beiden gröberen Filterkiesen (Versuche Nr. 6 und 7). Ein sichtbarer Unterschied im Druckverlust zwischen den beiden gröberen Filterkiesen tritt erst bei erhöhtem Durchfluss auf, wobei der Filterkies 2.0-3.15 mm bei zunehmendem Durchfluss und damit erhöhter Geschwindigkeit zu leicht höheren Druckverlusten führt. Dieses Verhalten lässt sich durch die unterschiedliche Lagerungsdichte der Verkiesungsstrecke erklären: Der Versuch mit dem Filterkies 2.0-3.15 mm hat eine Lagerungsdichte von  $1.65 \text{ t/m}^3$ , während der Filterkies 1.4-2.2 mm eine etwas geringere Lagerungsdichte von  $1.58 \text{ t/m}^3$  aufweist. Durch die größere Verdichtung reduziert sich die Porosität, was eine Erklärung für die erhöhten Druckverluste bei zunehmender Fließgeschwindigkeit sein kann.

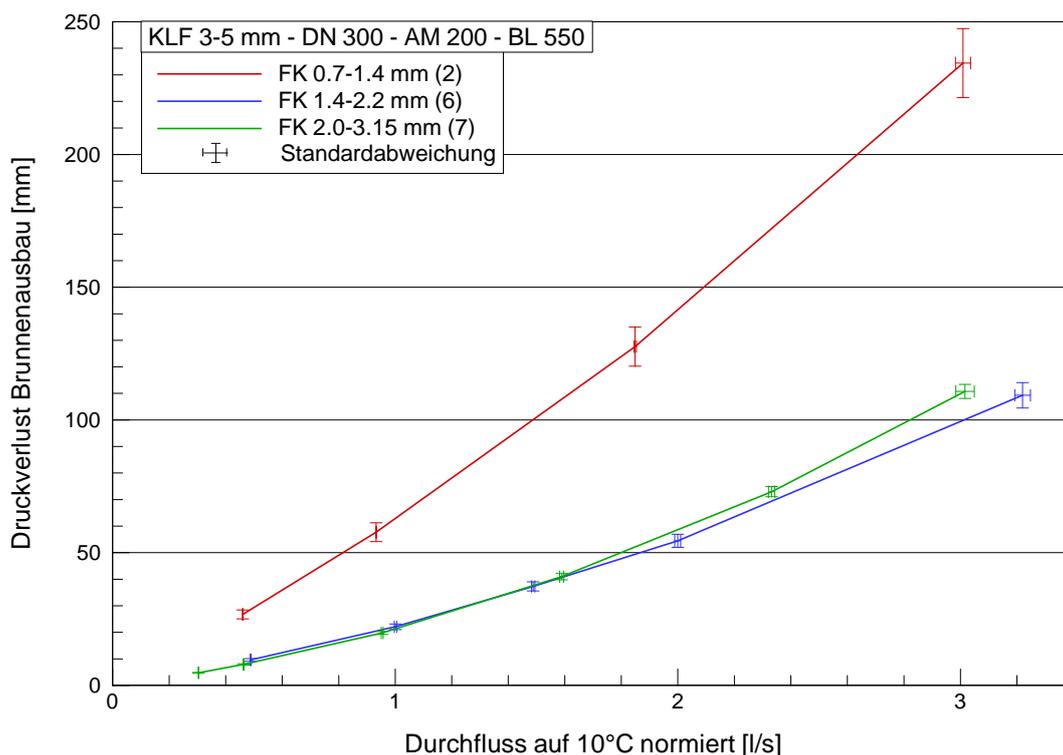


Abbildung 5.5: Druckverlust des Brunnenausbaus mit Kieslochfilter und drei verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss

Der Einfluss von vier verschiedenen Korngruppen auf den Brunnenausbauwiderstand für den Kiesstabfilter mit einer Kiesbekleidung von 3-5 mm ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Stan-

Standardverkiebung (Versuch Nr. 12) führt zu den größten Druckverlusten, während Versuch Nr. 14 mit dem groben Filterkies 2.0-3.15 mm die geringsten Druckverluste aufweist. Der Unterschied des groben Filterkieses zur Verkiebung mit 1.4-2.2 mm (Versuch Nr. 13) ist jedoch sehr gering. Der Versuch mit dem weiter gestuften Filterkies 0.7-2.2 mm (Nr. 15) zeigt im Verhältnis zur Standardverkiebung deutlich geringere Druckverluste auf der Brunnenausbaustrecke, aber auch deutlich größere als der Filterkies 1.4-2.2 mm.

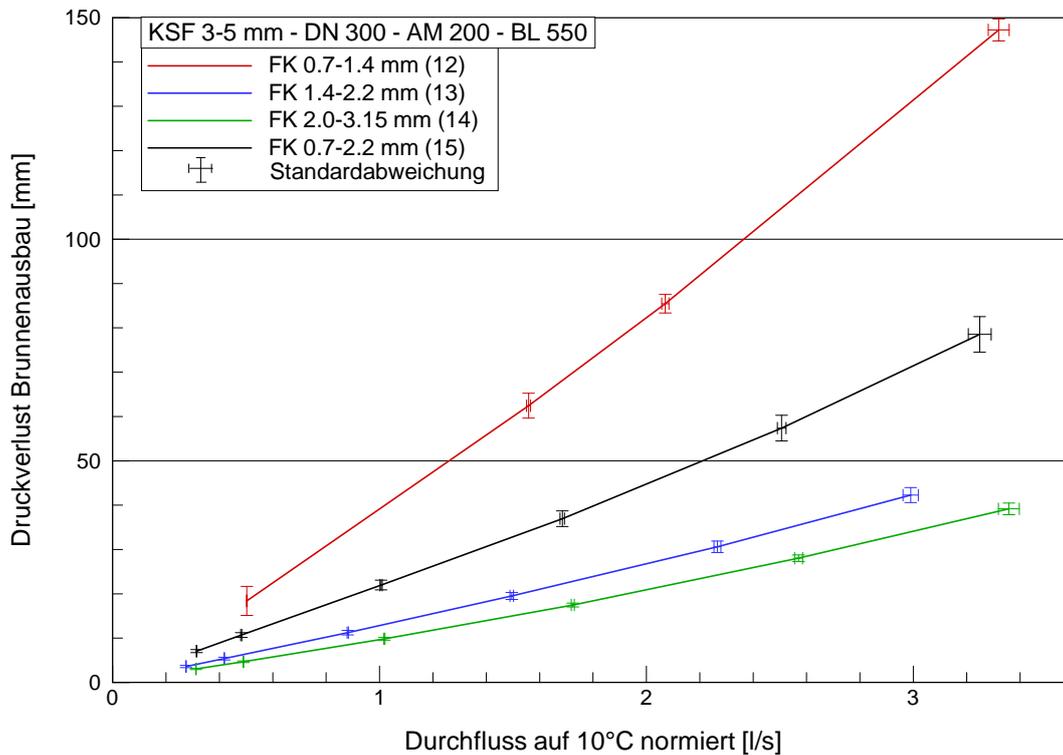


Abbildung 5.6: Druckverlust des Brunnenausbaus mit Kiesstabfilter und vier verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit einem Scheibenfilter (Spaltweite 0.8 mm) in Kombination mit drei verschiedenen Verkiebungen zeigt Abbildung 5.7. Neben der Standardverkiebung 0.7-1.4 mm (Versuch Nr. 40) wird ein Filterkies 1.4-2.2 mm (Versuch Nr. 42) und eine andere Abstufung mit 1.0-2.0 mm (Versuch Nr. 41) verwendet. Die Standardverkiebung führt bei diesem Vergleich wieder zu stark erhöhten Druckverlusten. Das Ergebnis der Verkiebung mit 1.0-2.0 mm liegt im Bereich der Verkiebung mit 1.4-2.2 mm. Allerdings sind auch die Sieblinien beider Filterkiese in Abbildung 4.5 fast deckungsgleich.

Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit einem Wickeldrahtfilter 0.5 mm bei drei unterschiedlichen Korngruppen. Durch Verwendung eines Filterkieses 1.4-2.2 mm (Versuch Nr. 52) reduziert sich der Brunnenausbauwiderstand im Vergleich zur Standardverkiebung (Versuch Nr. 51) sehr stark. Bei der größeren Verkiebung mit 2.0-3.15 mm (Versuch Nr. 53) ist diese Reduzierung noch einmal geringfügig größer.

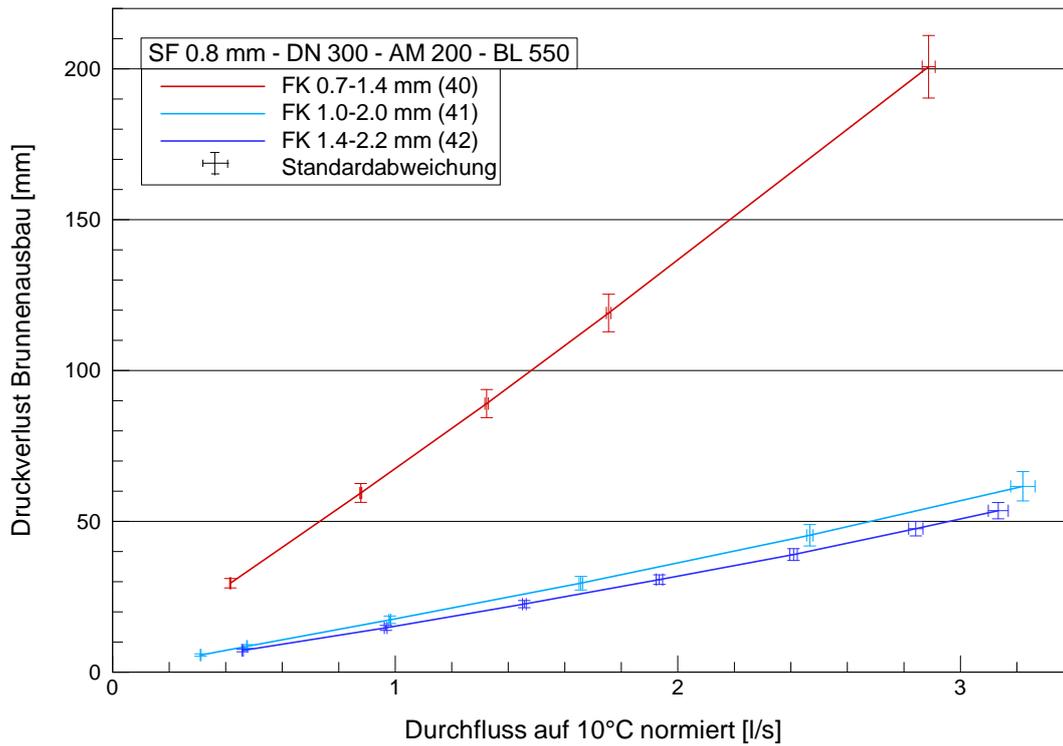


Abbildung 5.7: Druckverlust des Brunnenausbaus mit Scheibenfilter und drei verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss

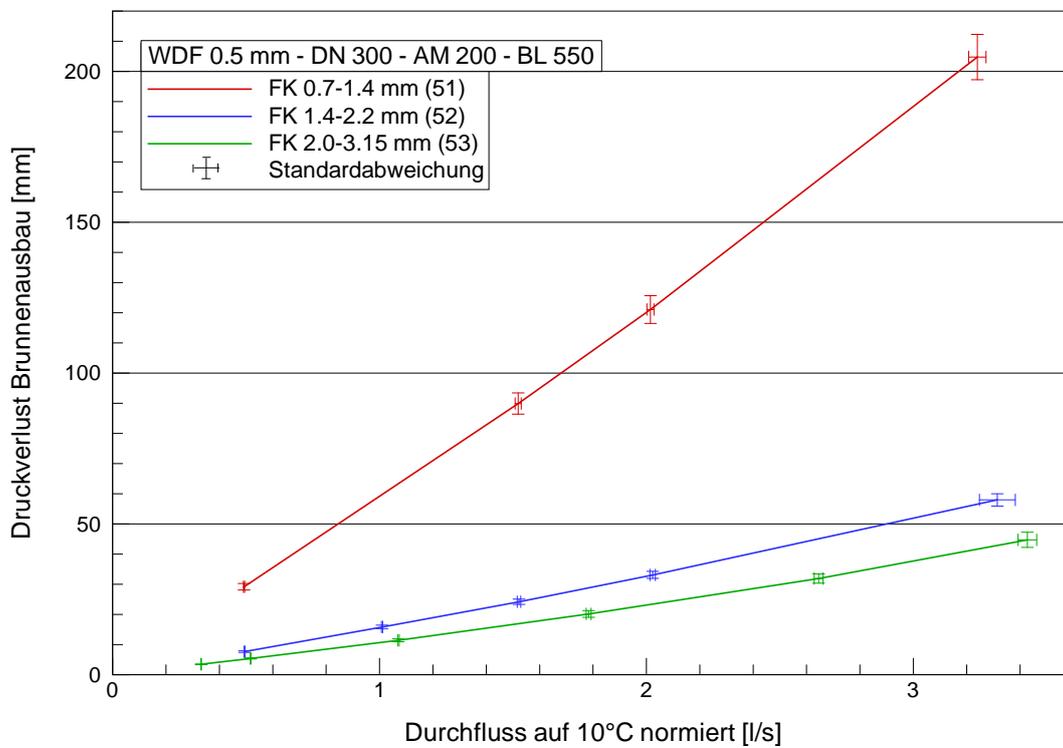


Abbildung 5.8: Druckverlust des Brunnenausbaus mit Wickeldrahtfilter und drei verschiedenen Korngruppen in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss

Anhand der Ergebnisse zur Variation der Korngruppe wird das Optimierungspotential für jeweils gleiche Filterrohre aufgrund der Filterkieswahl deutlich. Die bisher verwendete Standardverkiesung für das vorliegende Aquifermaterial mit 0.7-1.4 mm zeigt unabhängig vom verwendeten Filterrohr deutlich höhere Druckverluste im Vergleich zu den größeren Verkiesungen.

Die grobe Verkiesung 2.0-3.15 mm mit einem Filterfaktor  $F_g = 11.6$  hat sich im Laborversuch als filterstabil erwiesen. Allerdings sind die Randbedingungen im Laborversuch auch optimal für die Filterstabilität, da eine gleichmäßige Verdichtung des Aquifermaterials vorliegt. Als Anhaltswert ist nach DVGW W 113 (2001) der Filterfaktor für das vorliegende, gleichförmige Aquifermaterial mit  $F_g = 6.5$  anzusetzen. Weil die zusätzliche Reduzierung des Druckverlustes, die bei der groben Verkiesung 2.0-3.15 mm im Vergleich zum Filterkies 1.4-2.2 mm erzielt wird, als geringfügig zu betrachten ist, wird für die weiteren Untersuchungen bezüglich der Filterrohrvariation der Filterkies 1.4-2.2 mm ( $F_g = 7.9$ ) ausgewählt.

## 5.4 Einfluss des Filterrohrs auf den Brunnenausbauwiderstand

Insgesamt werden fünf verschiedene Filterrohrtypen untersucht, wobei für die jeweiligen Typen die Öffnungsweiten, Öffnungsformen und Kiesbeklebungen variiert werden.

### 5.4.1 Einfluss der Öffnungsweite

Für die nicht beklebten Filterrohre Scheibenfilter und Wickeldrahtfilter ist die Spaltweite variabel und muss daher für den ausgewählten Filterkies 1.4-2.2 mm bestmöglich eingestellt werden. Für den Scheibenfilter wird die Spaltweite durch Verwendung von Unterlegscheiben in folgenden Abstufungen eingestellt:

- 0.5 mm
- 0.8 mm
- 1.0 mm
- 1.3 mm
- 1.5 mm

Die Ergebnisse dieser fünf verschiedenen Schlitzweiten bei einer Verkiesung mit 1.4-2.2 mm sind in Abbildung 5.9 dargestellt.

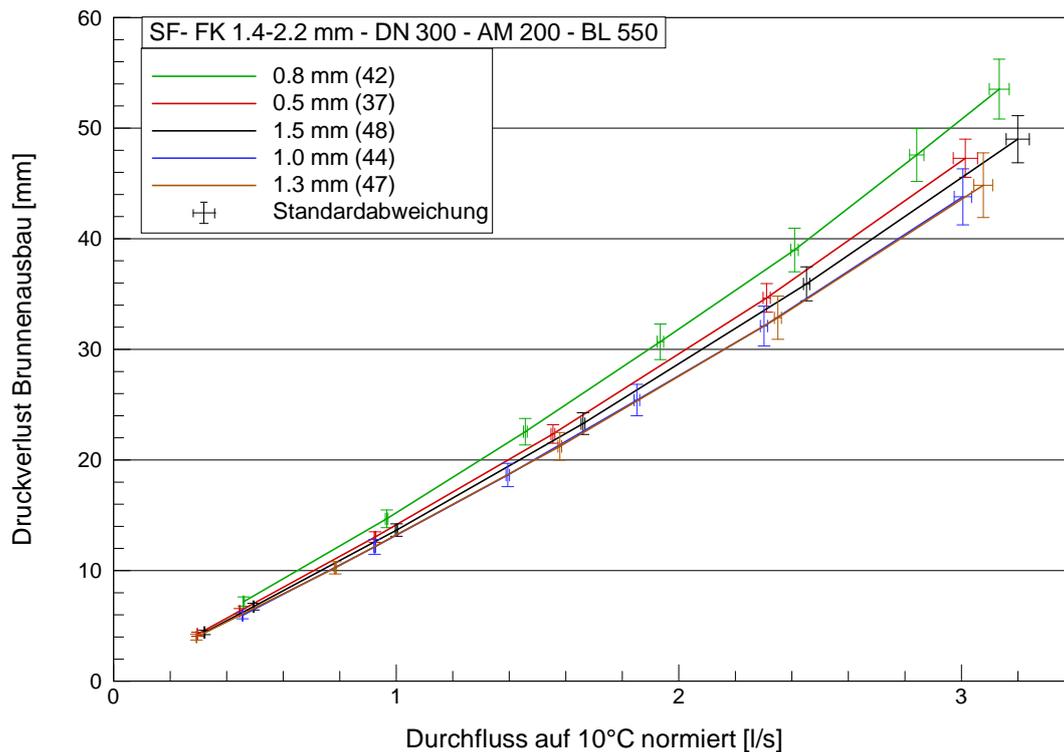


Abbildung 5.9: Druckverlust des Brunnenausbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Scheibenfilter mit unterschiedlichen Spaltweiten und 1.4-2.2 mm Verkiesung

Auffällig ist die geringe Bandbreite der erzielten Brunnenausbauwiderstände zwischen den einzelnen Versuchen mit unterschiedlichen Spaltweiten. Die Spaltweiten 1.0 mm (Versuch Nr. 44) und 1.3 mm (Versuch Nr. 47) erzeugen die geringsten Druckverluste, während die Schlitzweite 0.8 mm (Versuch Nr. 42) den größten Druckverlust aufweist. Einen Einfluss der Spaltweite auf den Brunnenausbauwiderstand ist bei dieser engen Bandbreite nicht feststellbar, da die Abweichungen zwischen den einzelnen Kurven im Bereich der Standardabweichung der Messwerte liegen. Somit können die Unterschiede auch durch Messungenauigkeiten begründet werden.

Für den Wickeldrahtfilter werden drei verschiedene Spaltweiten mit 0.5 mm (Versuch Nr. 52), 0.8 mm (Versuch Nr. 59) und 1.0 mm (Versuch Nr. 61) getestet, deren Ergebnisse in Abbildung 5.10 dargestellt sind. Der Versuch mit der kleinsten Spaltweite führt zu den kleinsten Druckverlusten, während der Versuch mit der größten Spaltweite die größten Druckverluste hervorruft. Dieses Verhalten kann durch die unterschiedlichen Filterkieslagerungsdichten der Einzelversuche hervorgerufen werden, da der Versuch mit dem Wickeldrahtfilter 1.0 mm die größte Lagerungsdichte ( $1.64 \text{ t/m}^3$ ) und der Versuch mit dem Wickeldrahtfilter 0.5 mm die kleinste Lagerungsdichte ( $1.57 \text{ t/m}^3$ ) der drei Versuche aufweist. Somit hat die Lagerungsdichte des Filterkieses einen größeren Einfluss auf den Druckverlust als die Spaltweite des Wickeldrahtfilters.

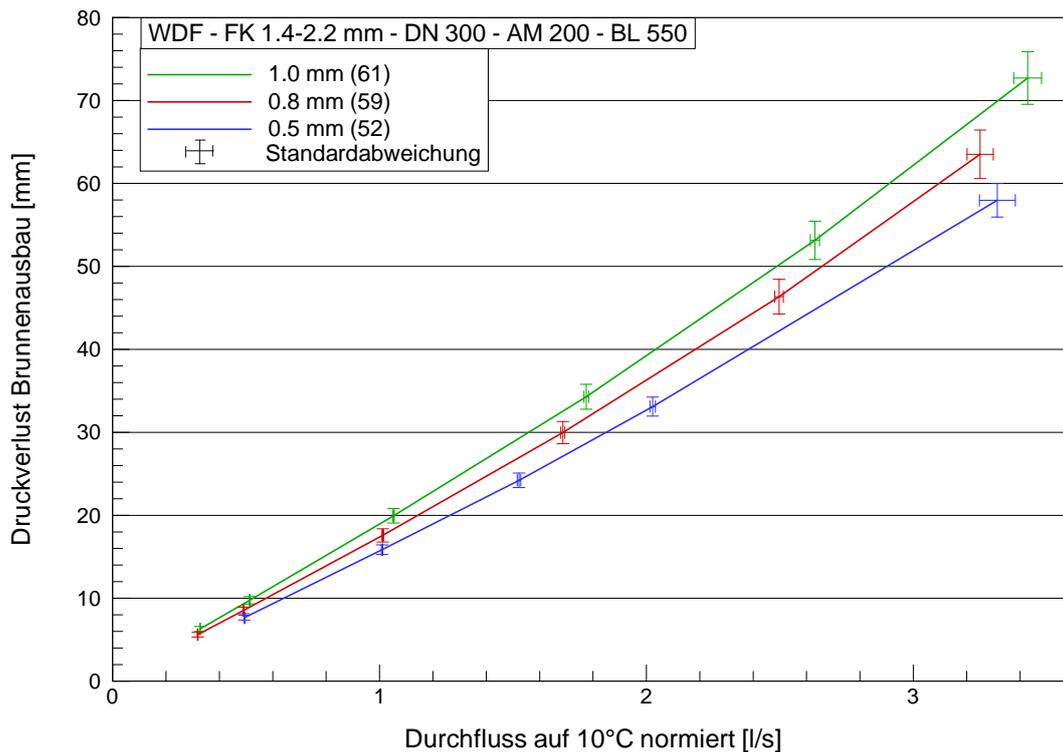


Abbildung 5.10: Druckverlust des Brunnenbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Wickeldrahtfilter mit drei unterschiedlichen Schlitzweiten und 1.4-2.2 mm Verkiesung

#### 5.4.2 Einfluss der Öffnungsform

Unterschiedliche Öffnungsformen der Filterrohre werden durch den Vergleich der Brunnenbauwiderstände zwischen der Wickeldrahttechnik, der Schlitzbrückenlochung und der Scheibenöffnung untersucht. Alle drei Filterrohre weisen eine Öffnungsweite von 1.0 mm auf. Die unterschiedlichen Abmessungen und Öffnungsformen sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

Die Spaltöffnungen sind beim Wickeldraht- und Scheibenfilter horizontal über den gesamten Kreisumfang angeordnet, während die Brückenlochung mit vertikalen Schlitz ausgeführt wird. Die offene Filterfläche, nach DIN 4922 (1978) für den Schlitzbrückenfilter und nach DIN 4935 (2002) für den Wickeldrahtfilter berechnet, ist mit 6.3 % am kleinsten für den Schlitzbrückenfilter. Sie nimmt mit 16.6 % für den Scheibenfilter bis 25 % für den Wickeldrahtfilter zu. Da sich der Scheibenfilter noch in der Entwicklung befindet und somit keine Norm für die Berechnung der offenen Filterfläche vorliegt, wird diese aus der Geometrie des vorliegenden Filterrohrs ermittelt.

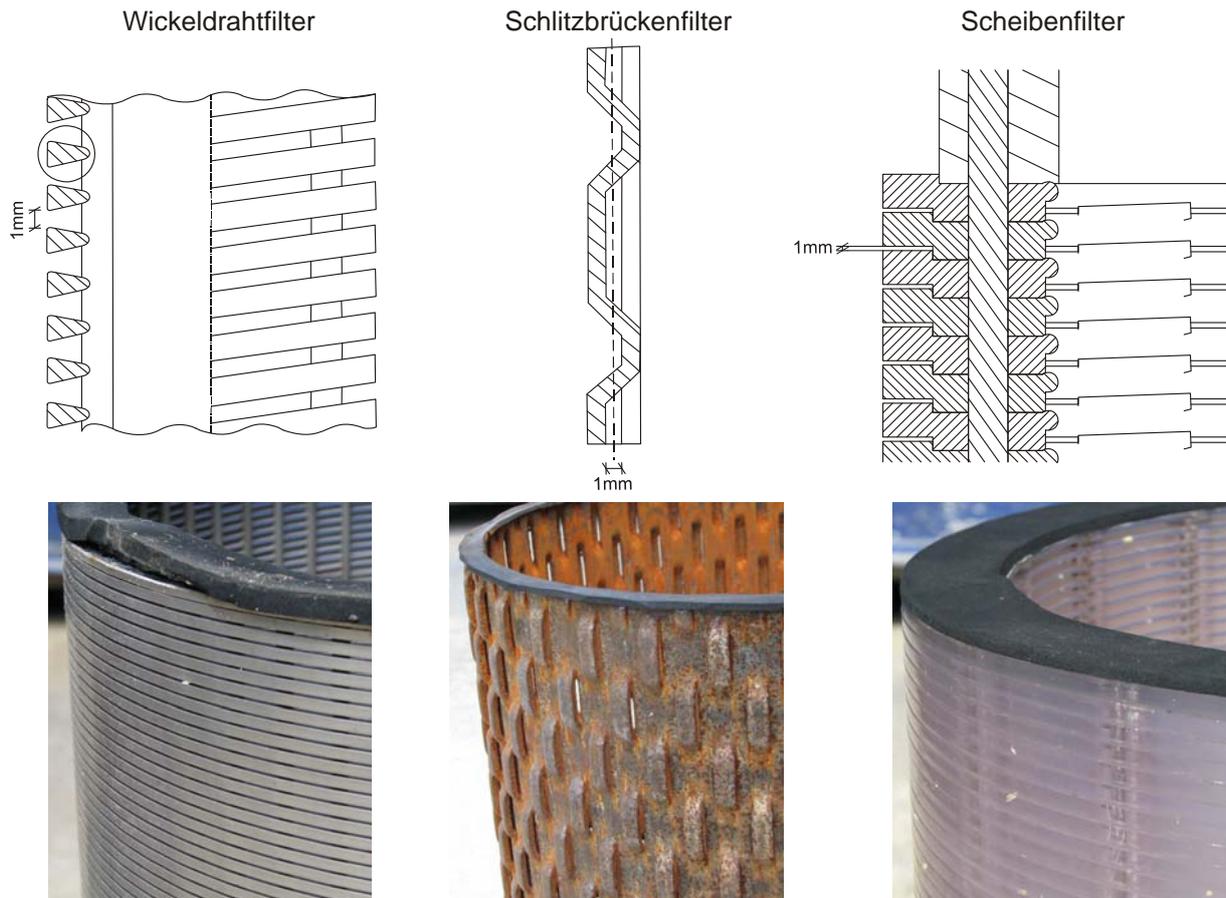


Abbildung 5.11: Öffnungsformen beim Wickeldraht-, Schlitzbrücken- und Scheibenfilter mit einem nicht maßstabgetreuen Schnitt durch die Filterrohrwand (oben) und einer Nahaufnahme des jeweiligen Filterrohrs (unten)

Die gemessenen Brunnenausbauwiderstände in Abhängigkeit vom Durchfluss sind für diese drei Filterrohre in Abbildung 5.12 dargestellt. Hier erzielt der Scheibenfilter die kleinsten Druckverluste, während der Schlitzbrückenfilter mit der geringsten offenen Durchtrittsfläche von den drei Filterrohren die größten Druckverluste aufweist. Die Ergebnisse des Wickeldrahtfilters liegen zwischen den beiden anderen Filterrohren. Die Lagerungsdichten des Filterkieses betragen  $1.64 \text{ t/m}^3$  für den Schlitzbrückenfilter sowie  $1.63 \text{ t/m}^3$  für den Wickeldrahtfilter und  $1.59 \text{ t/m}^3$  für den Scheibenfilter. Somit ist keine direkte Abhängigkeit des Druckverlustes von der freien Filterfläche festzustellen, sondern die Lagerungsdichte des Filterkieses beeinflusst zusätzlich den Brunnenausbauwiderstand.

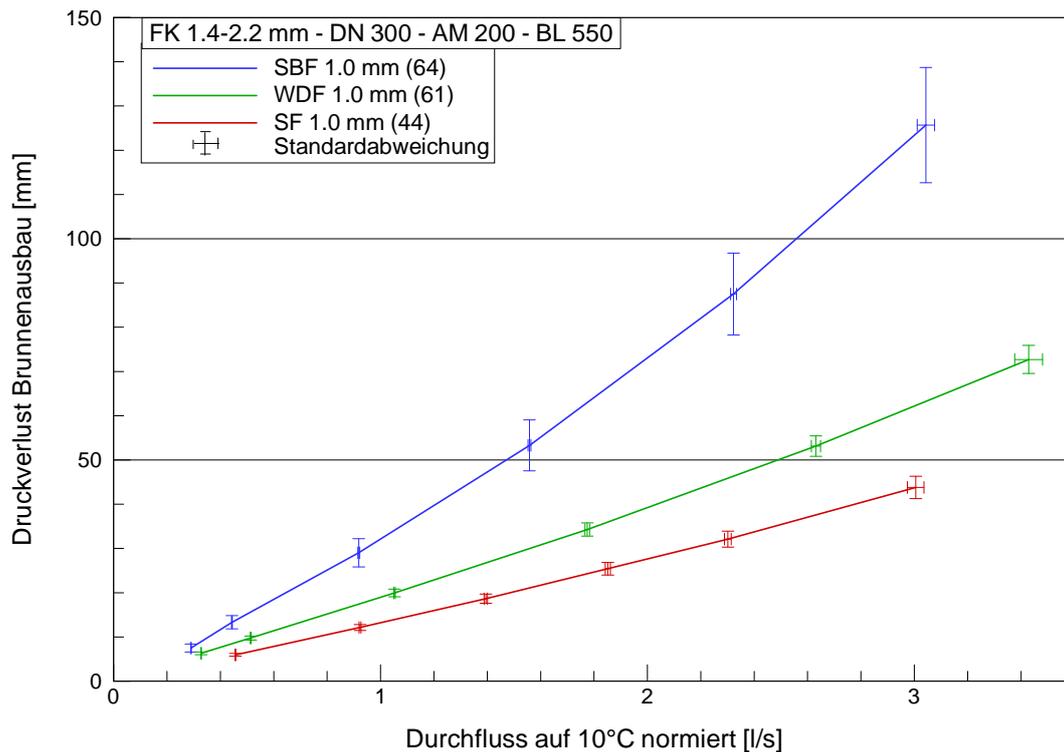


Abbildung 5.12: Druckverlust des Brunnenausbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Wickeldrahtfilter, Schlitzbrückenfilter und Scheibenfilter mit einer Öffnungsweite von 1.0 mm und einer Verkiesung mit 1.4-2.2 mm

### 5.4.3 Einfluss der Kiesbekleidung

Die beiden Kiesbekleibungsvarianten mit 3-5 mm und 4-7 mm werden für die drei Filterrohrtypen Kiesstabfilter, Kieslochfilter und Schlitzbrückenfilter jeweils mit dem Filterkies 1.4-2.2 mm untersucht.

Die Ergebnisse des Kiesstabfilters mit einer Verkiesung von 1.4-2.2 mm zeigt Abbildung 5.13. Zwischen der Kiesbekleibung mit 3-5 mm (Versuch Nr. 13) und 4-7 mm ist bei diesem Filterrohr kein signifikanter Unterschied im Widerstandsverhalten des Brunnenausbaus feststellbar. Somit hat die Kiesbekleibung bei dieser Verkiesung und diesem Filterrohr nur einen untergeordneten Einfluss auf den Brunnenausbauwiderstand. In einem weiteren Versuch wird bei diesem Filterrohr zusätzlich eine veränderte Harzzusammensetzung der Kiesbekleibung untersucht (Hobas, Versuch Nr. 30). Der Einfluss dieser Veränderung zeigt sich durch einen erhöhten Druckverlust im Vergleich zum Referenzversuch Nr. 27 (KSF 4-7 mm FK 1.4-2.2 mm). Allerdings tritt der Effekt erst bei zunehmendem Durchfluss auf, erhöht sich dann aber überproportional im Vergleich zum Referenzversuch.

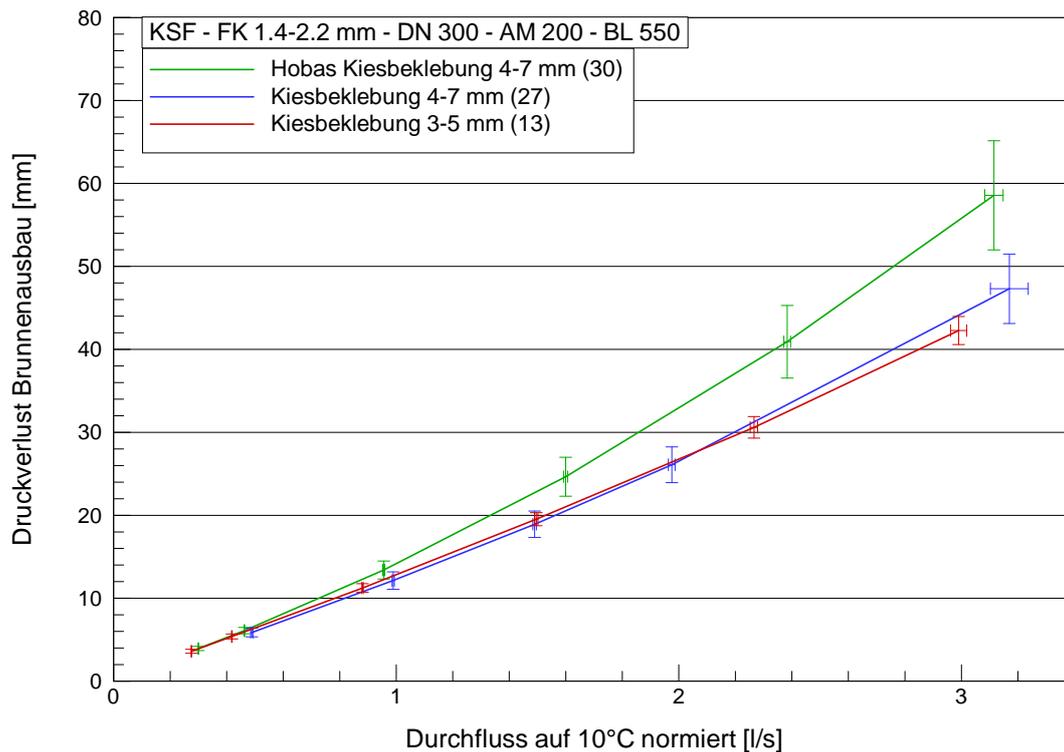


Abbildung 5.13: Druckverlust des Brunnenausbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Kiesstabfilter mit unterschiedlicher Kiesbekleidung und 1.4-2.2 mm Verkiesung

Die Kiesbekleidung mit 4-7 mm (Versuch Nr. 9) führt beim Kieslochfilter (siehe Abbildung 5.14) zu deutlich geringeren Druckverlusten als die 3-5 mm Kiesbekleidung (Versuch Nr. 6). Der Brunnenausbauwiderstand wird durch die gröbere Kiesbekleidung des Filterrohrs bei anwachsendem Durchfluss immer stärker reduziert.

Einen geringeren Einfluss der Kiesbekleidung auf den Brunnenausbauwiderstand zeigen die Versuche mit dem Schlitzbrückenfilter in Abbildung 5.15. Bei diesem Filterrohr ändert sich konstruktiv bedingt nicht nur die Kiesbekleidung, sondern auch die Schlitzweite von 2.5 mm (SBF 3-5 mm, Versuch Nr. 32) auf 3.5 mm (SBF 4-7 mm, Versuch Nr. 35). Auch bei diesem Filterrohr sind die gemessenen Druckverluste für die gröbere Kiesbekleidung etwas geringer, liegen jedoch aufgrund der Standardabweichung im Bereich der Messungenauigkeiten.

Zu beachten ist, dass Kieslochfilter und Schlitzbrückenfilter jeweils zusammengesetzte Filterrohre sind, welche aus einem Innenrohr mit Perforation und einer Kiesbekleidung aufgebaut sind. Daher wird bei diesen Filterrohren der Druckverlust zusätzlich noch durch die offene Fläche des Innenrohres beeinflusst. Beim Kiesstabfilter hingegen beeinflussen die vertikalen GFK-Stäbe die Anströmung nur minimal (Volumenanteil der Stäbe am Filterrohr beträgt ca. 3 %). Dieses Filterrohr zeigt daher am besten den Einfluss der Kiesbekleidung, da hier keine zusätzliche Beeinflussung durch eine Verbundwirkung vorliegt.

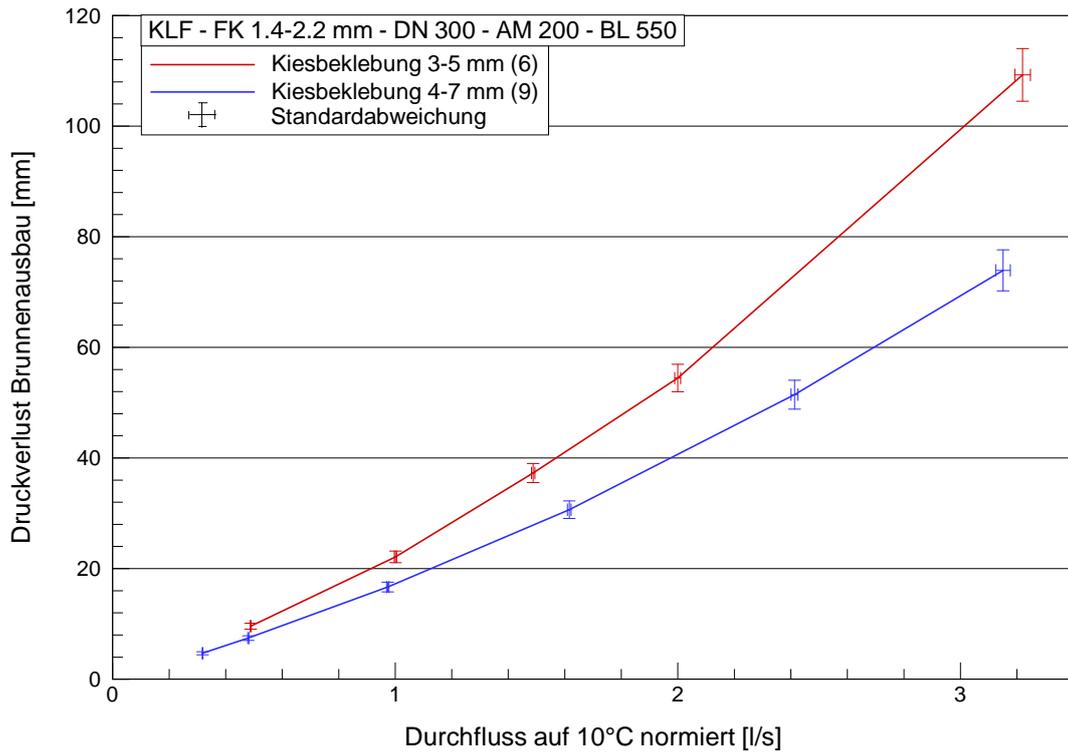


Abbildung 5.14: Druckverlust des Brunnenausbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Kieslochfilter mit unterschiedlicher Kiesbekleidung und 1.4-2.2 mm Verkiesung

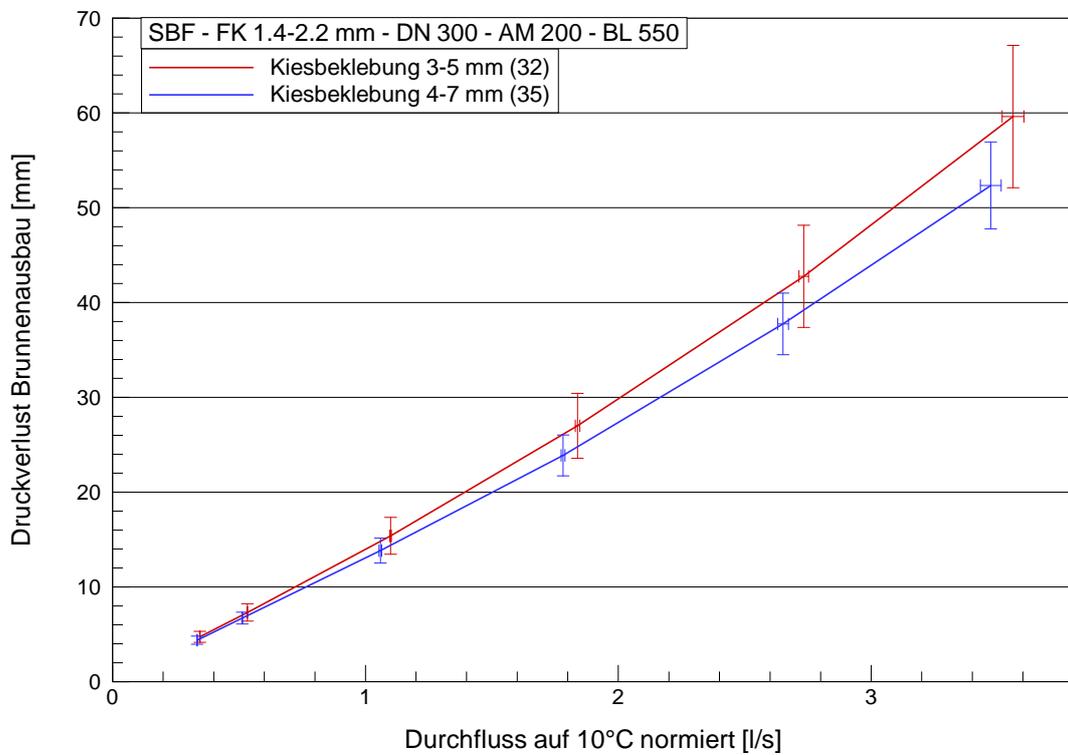


Abbildung 5.15: Druckverlust des Brunnenausbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für Schlitzbrückenfilter mit unterschiedlicher Kiesbekleidung und 1.4-2.2 mm Verkiesung

#### 5.4.4 Einfluss des Filterrohrtyps

Das Ergebnis der Variation des Filterrohrtyps wird aus den Ergebnissen in Abbildung 5.16 deutlich. Für den Vergleich werden von den fünf untersuchten Filterrohrtypen Kieslochfilter, Wickeldrahtfilter, Schlitzbrückenfilter, Scheibenfilter und Kiesstabfilter jeweils die Versuche mit den geringsten Druckverlusten bei einem Filterkies 1.4-2.2 mm ausgewählt. Auffallend ist der große Druckverlust bei Verwendung eines Kieslochfilters (Kiesbeklebung 4-7 mm). Aufgrund der im relativ weiten Abstand über die Mantelfläche verteilten Bohrungen muss das anströmende Wasser bei diesem Filterrohrtyp durch die Engstellen geführt werden, so dass diese zusätzliche Einschnürung eine Erklärung für die erhöhten Druckverluste ist. Beim Wickeldrahtfilter (Spaltweite 0.5 mm) führt der Einfluss der relativ großen Verkiesungsstrecke zu erhöhten Druckverlusten. Der Schlitzbrückenfilter (Kiesbeklebung 4-7 mm) zeigt wie der Scheibenfilter und der Kiesstabfilter (Spaltweite 1.0 mm bzw. Kiesbeklebung 3-5 mm) die geringsten Ausbauwiderstände. Bei diesen drei Filterrohrtypen ist anhand der durchgeführten Untersuchungen kein Unterschied bezüglich der Druckverluste feststellbar.

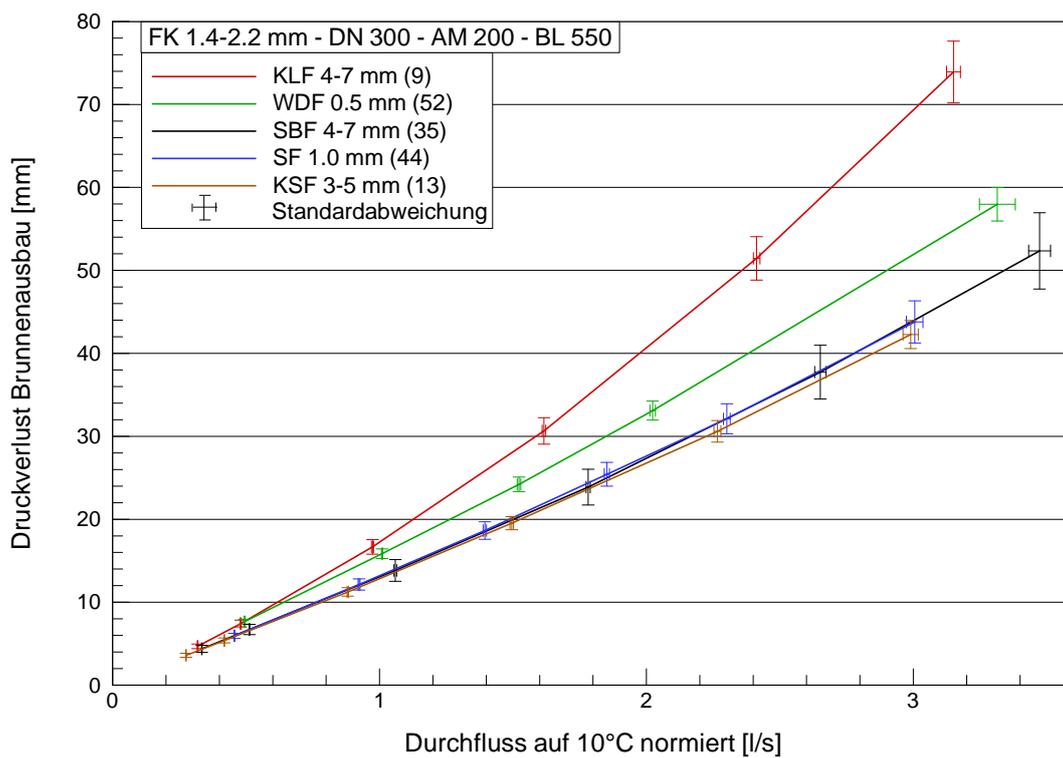


Abbildung 5.16: Druckverlust des Brunnenausbaus in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jeden Filterrohrtyp als bestes Ergebnis bei 1.4-2.2 mm Verkiesung

## 5.5 Bewertung und Schlussfolgerungen

Zunächst werden in der Tabelle 5.1 die Bandbreiten der aufgetretenen Durchflüsse und berechneten Druckverluste des Brunnenausbauwiderstands zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Minimale und maximale normierte Durchflüsse und Druckdifferenzen des Brunnenausbaus der vorgestellten Untersuchungen am Brunnenfiltermodell

Parameter	Minimum	Maximum
Durchfluss [l/s], normiert auf 10 °C	0.19	3.63
Druckverlust Brunnenausbau [mm]	1.9	253.3

Wichtig für die Wahl der Brunnenausbaumaterialien ist es, dass die Druckdifferenz bei der Durchströmung des Brunnenausbaus möglichst klein ist. Daher wird zur Bewertung der vorgestellten Untersuchungen festgelegt, dass eine Reduzierung des Brunnenausbauwiderstands um 20 % im Verhältnis zum maximal gemessenen Druckverlust eine signifikante Verbesserung darstellt. Somit ergibt sich anhand der Tabelle 5.1 ein Wert von ca. 50 mm als Richtwert zur Druckverlustreduzierung für die Einordnung der Ergebnisse.

Damit werden aus den vorangegangenen Auswertungen die folgenden Bewertungen zur Wahl des Filterkieses für den Brunnenausbau vorgenommen:

- Die Standardverkiebung 0.7-1.4 mm als Filterkies führt immer zu signifikant erhöhten Widerständen.
- Der Unterkorngehalt des Filterkieses hat bei der Standardverkiebung einen dominierenden Einfluss, da erhöhte Unterkorngehalte deutlich erhöhte Druckverluste verursachen.
- Die Kornform, die Lagerstättenherkunft und die Ungleichförmigkeit des Filterkieses haben nur einen untergeordneten Einfluss auf die Druckverluste.
- Die Korngruppe des Filterkieses hat einen signifikanten Einfluss, da gröbere Verkiebungen den Druckverlust reduzieren.
- Die Lagerungsdichte des Filterkieses beeinflusst trotz der geringen Abweichungen zwischen den jeweiligen Versuchseinbauten den Brunnenausbauwiderstand.

Ein auf das Aquifermaterial gut abgestimmter Filterkies mit einem geringen Unterkorngehalt kann somit einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung des Brunnenausbaus leisten.

Bei keinem der Versuche ist eine verstärkte Sandführung aufgetreten, alle Filterkiese sind filterstabil für den untersuchten Geschwindigkeitsbereich. Auch der Vergleich der Sieblinien vor und nach dem jeweiligen Versuch (siehe SCHÜTTRUMPF et al., 2009) zeigt keine signifikanten Abweichungen, die auf einen Materialaustrag hindeuten.

Für das Filterrohr lassen sich die folgenden Aussagen aufgrund der vorangegangenen Auswertungen treffen:

- Die Öffnungsweite hat im Vergleich zum Filterkies einen untergeordneten Einfluss auf den Druckverlust des Brunnenausbaus.
- Die Öffnungsform und die freie Durchtrittsfläche des Filterrohrs beeinflussen den Druckverlust bei gleicher Verkiesung.
- Die Kiesbeklebung hat nur einen untergeordneten Einfluss auf den Brunnenausbauwiderstand.
- Im Vergleich zu den anderen Filterrohrtypen zeigt der Kieslochfilter in allen Versuchen erhöhte Druckverluste, so dass dieses Filterrohr durch seine Engstellen im Nachteil gegenüber den anderen Filterrohren ist.

Insgesamt wird jedoch festgehalten, dass der Einfluss einzelner Parameter des Filterrohrs wie Öffnungsweite, Kiesbeklebung, Öffnungsform oder freie Durchtrittsfläche nicht abschließend zu bewerten ist, da bei den vorliegenden Filterrohren häufig eine Kombination der einzelnen Parameter vorliegt. Zum Beispiel weisen die Wickeldrahtfilter im Vergleich zum Scheibenfilter unterschiedliche freie Durchtrittsflächen bei gleicher Spaltweite auf, daher ist ein Vergleich der Öffnungsformen nicht losgelöst von der freien Durchtrittsfläche möglich. Auch bei der Kiesbeklebung sind unterschiedliche Öffnungsformen und freie Durchtrittsflächen beim Trägerrohr vorhanden, so dass auch hier eine gegenseitige Beeinflussung nicht auszuschließen ist.

Die in den Abbildungen dargestellten Standardabweichungen zeigen, dass die umfangreichen Maßnahmen zur Sicherstellung gleichbleibender Versuchsrandbedingungen erfolgreich umgesetzt wurden. Die gleichmäßige radiale Durchströmung über die gesamte Versuchsbehälterhöhe ohne störende Wandeinflüsse, wie sie in Kreissegmentmodellen auftreten, ist unter Berücksichtigung der Modellvereinfachungen, welche in Kapitel 4.7 diskutiert wurden, nachgewiesen.

Die vorliegenden Auswertungen zum Druckverlust des Brunnenausbaus beruhen auf der gemeinsamen Erfassung der Filterkies- und Filterrohrdruckverluste in einem radialen Brunnenausschnittsmodell. Damit werden die Interaktionen zwischen Filterkies und Filterrohr an der Trennfläche berücksichtigt, jedoch nicht getrennt von den Einzelkomponenten betrachtet. Da die miteinander zu vergleichenden Kurven der vorgestellten Untersuchungen häufig sehr dicht beieinander liegen, ist trotz der geringen Standardabweichungen keine eindeutige Aussage bezüglich des Einflusses verschiedener Parameter möglich.

Die qualitative Beschreibung der Phänomene lässt außerdem keine quantitative Aussage bezüglich der Ergiebigkeit von Brunnen zu, da die Durchströmung des Aquifermaterials nicht

für die Auswertung zum Brunnenausbauwiderstand berücksichtigt wurde. Auch zeigen die Ergebnisse einen vermutlich signifikanten Einfluss der Lagerungsdichte des Filterkieses.

Daher wird im nächsten Kapitel untersucht, ob die theoretischen Grundlagen zur Durchströmung poröser Medien auf die komplexe Situation der Brunnenanströmung mit einer Reihenschaltung von drei verschiedenen Komponenten übertragen werden können, so dass eine getrennte Analyse der Trennflächenwiderstände zwischen den Einzelkomponenten vorgenommen werden kann. Die Berücksichtigung eines geeigneten Porenraummodells zur Ermittlung der Durchflusswiderstände des Aquifermaterials und des Filterkieses ermöglicht dann auch Aussagen bezüglich des Einflusses verschiedener Parameter wie Lagerungsdichte oder Korngröße.

## 6 Theoretische Beschreibung der Strömungsprozesse im Brunnennahbereich bei gespannten Verhältnissen

### 6.1 Vorbemerkungen

Die Zielsetzung dieses Kapitels ist es, ein analytisches Gesamtmodell für den Druckverlauf bei der Durchströmung verschiedener Einzelkomponenten abzuleiten, mit dem sowohl der Einfluss des Strömungsregimes als auch die Prozesse an den Kontaktflächen bewertet werden können. Die Vorgehensweise ist dabei wie folgt: Zunächst werden die Reynoldszahlen bestimmt, um festzulegen, welcher Regimebereich für die Einzelkomponenten vorliegt. Damit wird das passende Widerstandsgesetz gewählt, so dass aus den gemessenen Werten die benötigten Materialparameter mit der Brunnenformel bestimmt werden können. Diese Parameter werden mit Literaturwerten verglichen, um eine Einordnung der ermittelten Werte vornehmen zu können. Die Gleichungen für die Einzelkomponenten werden abschließend zu einem Gesamtsystem zusammengefasst und eine Auswertung der Trennflächendruckdifferenzen vorgenommen.

### 6.2 Ermittlung der Reynoldszahlen für die Einzelkomponenten

Die Reynoldszahlen der Durchströmung werden auf der Grundlage der Gleichung (2.11) unter Verwendung des wirksamen Korndurchmessers  $d_w$  (vgl. Kapitel 4.6.2) als charakteristische Korngröße  $d_{char}$  für die einzelnen verwendeten porösen Materialien aus den Messwerten berechnet. Für die Filterrohre wird die Reynoldszahl an der Filterrohrinnenseite ermittelt. Zur Bestimmung der Reynoldszahl für die Filterrohre wird eine Annahme für den charakteristischen Korndurchmesser  $d_{char}$  benötigt. Das Filterrohr wird als poröses Medium nach Kapitel 3.5.1 angenommen, so dass der charakteristische Korndurchmesser den Filterrohröffnungen als Röhren mit einem definierten Querschnitt entspricht. Somit wird bei unbeklebten Filterrohren die Schlitz- oder Spaltweite als charakteristischer Korndurchmesser verwendet. Beim Schlitzbrückenfilter wird die Schlitzweite des Trägerrohrs als charakteristischer Korndurchmesser angesetzt, da diese im Vergleich zur möglichen Kiesbeklebung immer den kleineren Wert darstellt. Für den Kiesstabfilter wird der kleinste angegebene Korndurchmesser der Kiesschicht als charakteristischer Korndurchmesser angenommen. Beim Kieslochfilter ist die ausgebohrte Eintrittsöffnung des Trägerrohrs mit einer Kiesschicht beklebt, so dass auch hier wie beim Kiesstabfilter der kleinste angegebene Korndurchmesser der Kiesschicht als charakteristischer Korndurchmesser verwendet wird.

Die berechneten Reynoldszahlen  $Re$  werden in Abhängigkeit von dem dimensionslosen Widerstandsbeiwert  $\xi$  für das Aquifermaterial, für die Filterkiese und für die Filterrohre logarithmisch dargestellt. Die beiden dimensionslosen Kennzahlen  $Re$  und  $\xi$  nach Gleichung (2.11) und (2.12) sind nur dann sinnvoll für weitere Auswertungen anzuwenden, wenn der Druckverlust im Verhältnis zur durchströmten Länge konstant und nicht abhängig von dem betrachteten Punkt wie bei der radialen Brunnenanströmung ist. In diesem Fall variiert der Gradient mit dem Radius (vgl. Abbildung 3.17). Da die Fließgeschwindigkeit auch vom Radius abhängig ist, stellt sich die Frage, welche Geschwindigkeit bei einer Gradientenbetrachtung anzusetzen ist: die Fließgeschwindigkeit am größeren oder am kleineren Radius. Somit ist die Vorgehensweise nach Kapitel 2.3.2, welche bei der Auswertung von Säulenversuchen zur Ableitung der FORCHHEIMER-Koeffizienten angewendet wird, bei einer radialen Strömung nicht zielführend und wird deshalb nicht weiter verfolgt.

Im Folgenden wird die Reynoldszahl an den jeweiligen Druckmesspunkten ermittelt, um das vorherrschende Strömungsregime zu bestimmen. Der Widerstandsbeiwert  $\xi$  nach Gleichung (6.1) wird, gegenüber der Gleichung (2.12), in leicht veränderter Form ohne einen Gradienten ermittelt, um für jeden Messpunkt die Fließgeschwindigkeit und den Druck in Abhängigkeit vom Radius als Ausgangsgrößen verwenden zu können.

$$\xi = \frac{g \cdot d_{char}}{v_f^2} \cdot \frac{h}{r} \quad (6.1)$$

### 6.2.1 Aquifermaterial

In Abbildung 6.1 sind die Reynoldszahlen in Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes für alle Messwerte im Aquifermaterial dargestellt. Die Ergebnisse bilden ein breites Band mit abnehmendem Widerstandsbeiwert bei zunehmender Reynoldszahl.

Die Ableitung der kritischen Reynoldszahl  $Re_{krit}$  für das Aquifermaterial wird exemplarisch für jeden Versuch am Druckmesspunkt mit dem kleinsten Radius und dementsprechend der größten Fließgeschwindigkeit durchgeführt (Abbildung 6.2). Die lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 \geq 0.99$  für die dargestellten Versuche zeigt, dass keine Abweichungen vom linearen Zusammenhang zwischen der Reynoldszahl  $Re$  und dem Widerstandsbeiwert  $\xi$  auftreten. Daher kann keine kritische Reynoldszahl  $Re_{krit}$  zur Änderung des Strömungsregimes für die Messergebnisse im Aquifermaterial bestimmt werden. Die Strömung im Aquifermaterial befindet sich somit für die vorliegende Untersuchung im linear-laminaren Regimebereich.

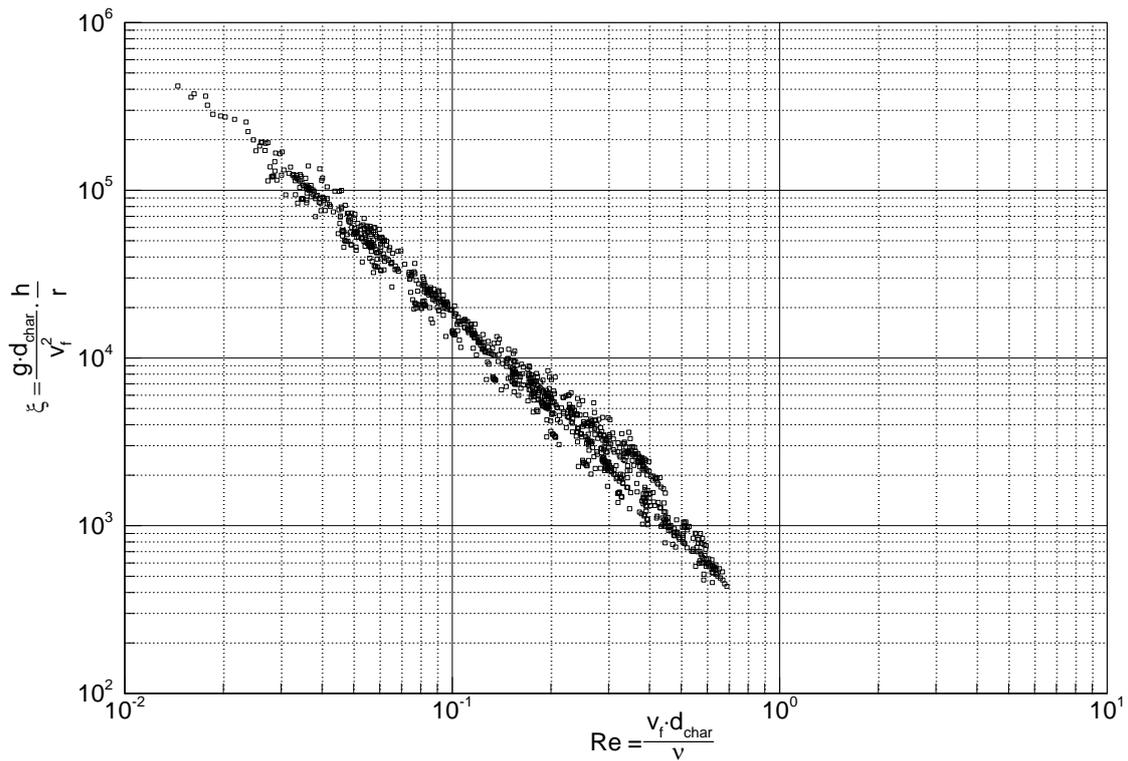


Abbildung 6.1: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für alle Druckmessergebnisse im Aquifermaterial

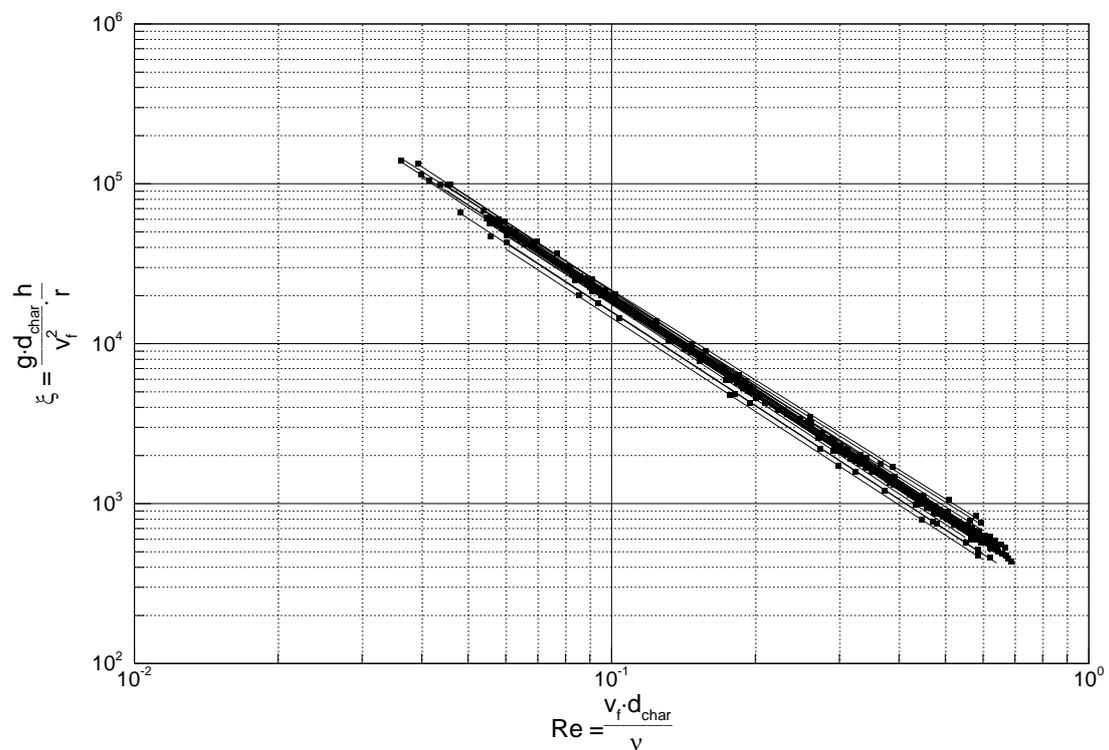


Abbildung 6.2: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl mit Annahme linearer Regression für Druckmessergebnisse im Aquifermaterial zur Ermittlung  $Re_{\text{krit}}$

## 6.2.2 Filterkies

Abbildung 6.3 enthält die berechneten Reynoldszahlen für alle Messpunkte im Filterkies in Abhängigkeit vom Widerstandsbeiwert nach Gleichung (6.1), wobei die verschiedenen Filterkiese farblich differenziert dargestellt werden. Die unterschiedlichen charakteristischen Korn-durchmesser für die einzelnen Filterkiese führen zur Separierung der Punktwolken in Abbildung 6.3, wie auch bei RUMPF & GUPTA (1971) beschrieben. Die Ermittlung der kritischen Reynoldszahl für die Abweichung vom linear laminaren Regime zum nichtlinear laminaren Regime bei der Durchströmung der Filterkiese erfolgt wie beim Aquifermaterial für jeden Versuch am Druckmesspunkt mit dem kleinsten Radius und dementsprechend der größten Fließgeschwindigkeit (Abbildung 6.4). Zum Vergleich sind exemplarisch Geraden eingezeichnet, anhand der die Abweichung vom linearen Zusammenhang erkennbar wird. Im Mittel tritt im Bereich einer Reynoldszahl von 1 eine sichtbare Abweichung zwischen dem linearen Verlauf und dem Kurvenverlauf der Einzelversuche auf. Eine Bestätigung, dass die kritische Reynoldszahl, wie in der Literatur angegeben, mit 1 angesetzt werden kann, wird graphisch erbracht. Nach optischer Prüfung der Kurvenverläufe in Abbildung 6.4 ist die Annahme  $Re_{krit} = 1$  gerechtfertigt, da dies den mittleren Bereich für die Abweichung vom linearen Zusammenhang darstellt. Daher wird diese kritische Reynoldszahl als Grenzwert für den Übergang vom DARCY-Bereich zum FORCHHEIMER-Bereich für den Filterkies festgelegt.

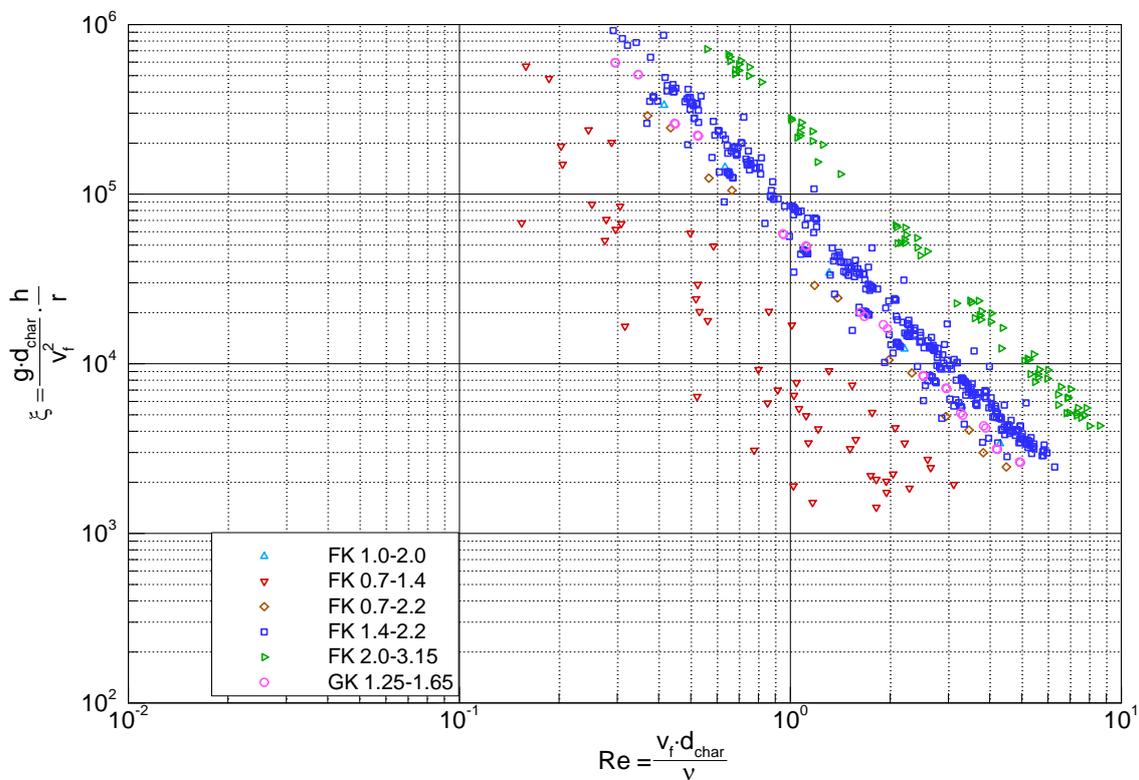


Abbildung 6.3: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für alle Druckmessergebnisse im Filterkies

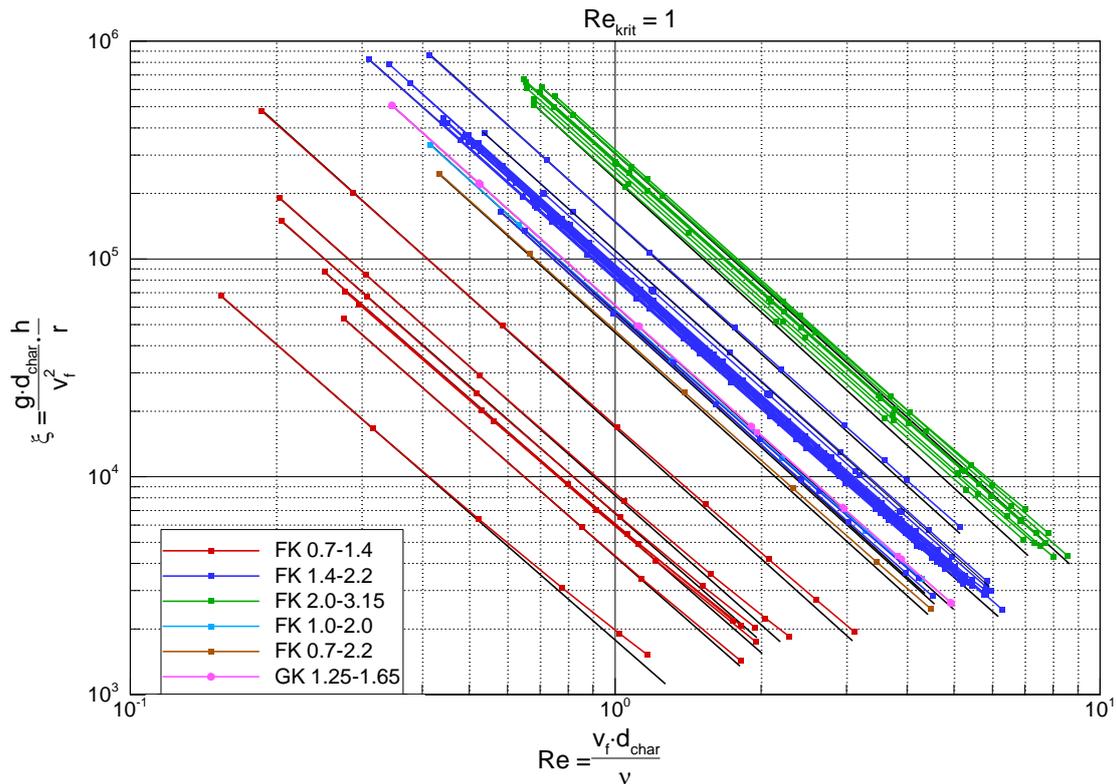


Abbildung 6.4: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für Druckmessergebnisse im Filterkies zur Ermittlung  $Re_{krit}$

### 6.2.3 Filterrohr

Die Darstellung der berechneten Widerstandsbeiwerte für die Filterrohre in Abhängigkeit von der Reynoldszahl zeigt Abbildung 6.5. Aufgrund der verschiedenen Filterrohrtypen mit den unterschiedlichen charakteristischen Öffnungsweiten bzw. Korngrößen sind die Ergebnisse in einzelne Bänder sortiert. Die Ableitung der kritischen Reynoldszahl wird anhand der Versuchsergebnisse aus Kapitel 5.2 vorgenommen, wobei die Messergebnisse als Druckverlust bezogen auf die Filterrohrwanddicke in Abhängigkeit von der Reynoldszahl dargestellt werden (Abbildung 6.6). Der Widerstandsbeiwert nach Gleichung (6.1) eignet sich in diesem Fall nicht zur Ableitung der kritischen Reynoldszahl, weil die Druckmesswerte an der Filterrohrinnenseite aufgrund des Versuchskonzeptes nur den Wert der freien Entlastung in Brunnenmitte widerspiegeln. Druckmesswerte direkt an der Filterrohraußenseite wurden nur bei den Versuchen zur Ermittlung der Filterrohrdurchlässigkeit bestimmt. Anhand der Kurvenverläufe in Abbildung 6.6 wird ersichtlich, dass in einem Reynoldszahlenbereich von  $Re = 0.8$  bis  $Re = 2$  ein Knick im Kurvenverlauf auftritt und der Kurvenverlauf für größere Reynoldszahlen nicht mehr linear ist. Wie beim Filterkies wird somit auch für die Durchströmung des Filterrohrs eine kritische Reynoldszahl von  $Re_{krit} = 1$  visuell abgeleitet, ab der kein linearer

Zusammenhang zwischen der Reynoldszahl  $Re$  und dem Druckverlust bezogen auf die Filterrohrwanddicke mehr besteht.

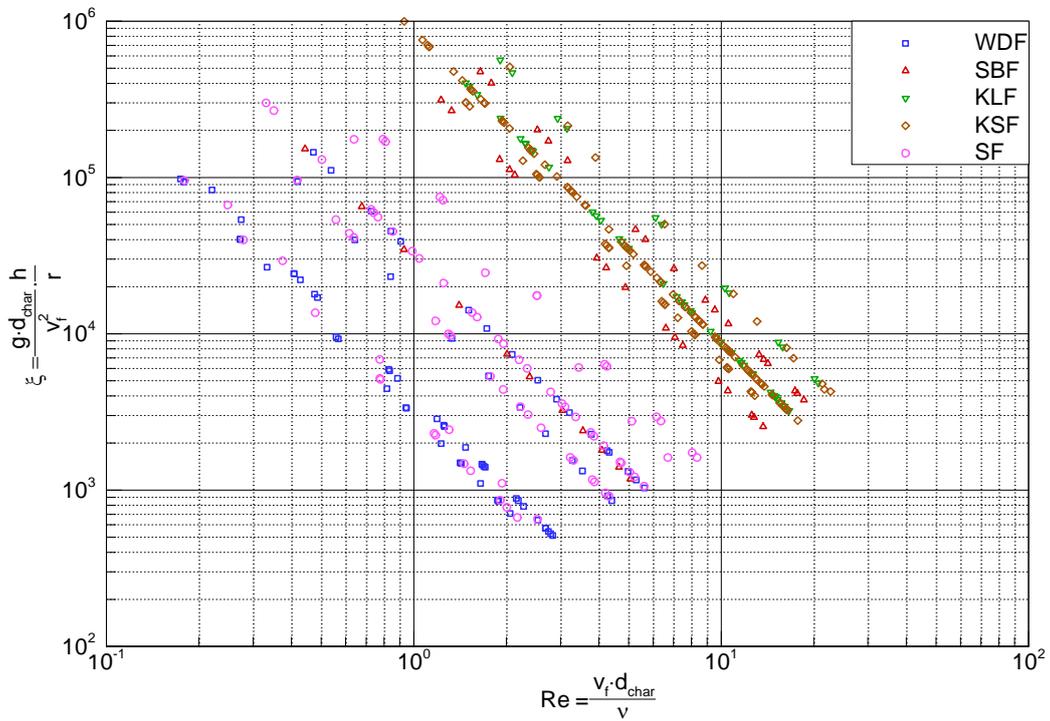


Abbildung 6.5: Dimensionslose Darstellung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für alle Druckmessergebnisse im Filterrohr

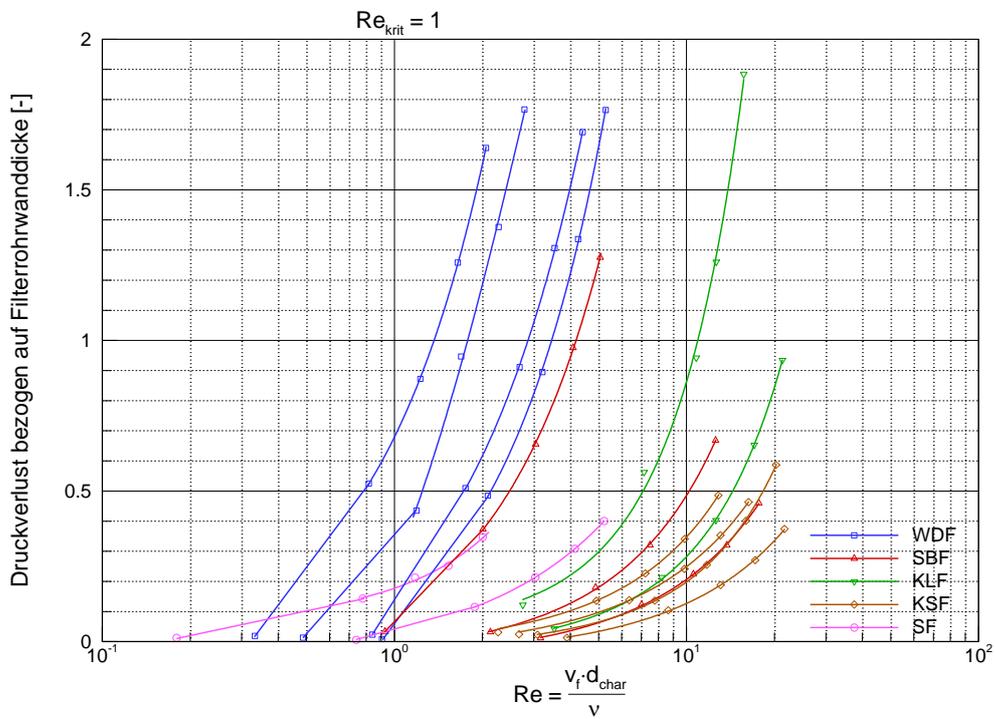


Abbildung 6.6: Dimensionslose Darstellung des Druckverlustes bezogen auf die Filterrohrwanddicke in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für Druckmessergebnisse im Filterrohr zur Ermittlung  $Re_{krit}$

## 6.2.4 Festlegung der Regimebereiche

Aus den Messergebnissen des Brunnenfiltermodells werden für das jeweils durchströmte Material die untersuchten Reynoldszahlenbereiche in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Minimale und maximale Reynoldszahlen in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien

Material	$Re_{\min}$ [-]	$Re_{\max}$ [-]
Aquifermaterial	0.015	0.69
Filterkies	0.15	8.59
Filterrohr	0.17	22.68

Da im Aquifermaterial eine kritische Reynoldszahl nicht erreicht wird, befindet sich die Strömung im Aquifermaterial bei dieser Untersuchung im linear laminaren Regimebereich und kann für alle Versuche mit der Brunnenformel nach Gleichung (3.7) beschrieben werden. Das Strömungsregime im Filterkies wechselt vom linear laminaren Bereich mit Reynoldszahlen kleiner 1 in den Übergangsbereich mit nichtlinear laminarer Strömung. Hierfür ist die FORCHHEIMER-Gleichung als Fließgesetz anzuwenden. Für die Koeffizientenermittlung werden folgerichtig nur die Versuchsergebnisse mit einer Reynoldszahl größer 1 berücksichtigt. Die Reynoldszahlen im Filterrohr liegen im vergleichbaren Größenbereich wie die Reynoldszahlen im Filterkies und als kritische Reynoldszahl wird ebenfalls ein Wert von 1 aus den Versuchsergebnissen ermittelt. Das Filterrohr wird als poröses Medium nach der Modellvorstellung aus Kapitel 3.5 angesehen, so dass die Filterrohrdurchlässigkeit durch einen quadratischen Ansatz nach SINGH & SHAKYA (1989) mit dem kinetischen Term der FORCHHEIMER-Gleichung berechnet werden kann.

Tabelle 6.2 enthält eine Übersicht der maximal erreichten Reynoldszahlen sowie der abgeleiteten kritischen Reynoldszahlen für die einzelnen Materialien und den daraus festgelegten Regimebereichen. Das zugrunde liegende Fließgesetz des Regimebereiches ist dabei ebenso angegeben wie die Gleichung für den Druckverlust beim Durchströmen des jeweiligen Materials. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass zukünftig noch weitere Untersuchungen mit Reynoldszahlen bis  $Re > 100$  durchzuführen sind, um auch den turbulenten Regimebereich abzudecken und die kritischen Reynoldszahlen hierfür bestimmen zu können.

Tabelle 6.2: Maximale und kritische Reynoldszahlen in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien mit Angabe des Regimebereiches und des Fließgesetzes

Material	$Re_{\max}$	$Re_{\text{krit}}$	Regime	Fließgesetz	Gleichung
Aquifermaterial	0.69	-	Linear laminar	DARCY	(3.7)
Filterkies	8.59	1	Nichtlinear laminar	FORCHHEIMER	(3.19)
Filterrohr	22.68	1	Nichtlinear laminar	Nichtlinearer Term FORCHHEIMER	(3.27)

### 6.3 Bestimmung der Materialparameter für die Einzelkomponenten

Für die Einzelkomponenten wird anhand der analytischen Brunnenformel mit entsprechendem Fließgesetz der jeweilige Verlauf der Druckhöhe als Funktion vom Radius berechnet. Die benötigten Materialparameter werden aus den gemessenen Durchflüssen und Druckhöhen durch eine Regressionsanalyse ermittelt. Anschließend erfolgt eine Einordnung der Koeffizienten durch einen Vergleich mit Literaturwerten.

#### 6.3.1 Aquifermaterial

Als Ansatz für die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit  $k_f$  des Aquifermaterials für den linear laminaren Bereich wird das Konzept des Hydraulischen Radius (KOZENY, 1927) mit der Erweiterung nach TRUSSELL & CHANG (1999) aus dem linearen Term in Gleichung (2.21) verwendet. Dieses Porenraummodell basiert auf der häufig genutzten Modellvorstellung von Poren als Kapillaren mit einem definierten Querschnitt und liefert eingesetzt in die Brunnenformel (3.7) nach Gleichung (6.2) den FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  als reziproken Wert der Durchlässigkeit für das linear laminare Strömungsregime.

$$H - h = \underbrace{2 \cdot T \cdot S_{FH}^2}_{A_E} \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{\nu}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (6.2)$$

$$a_F = \frac{1}{k_f}$$

Um die Tortuosität  $T$  und den Flächen-Volumen-Formfaktor  $S_{FH}$  für poröse Medien nicht direkt ermitteln zu müssen, werden diese geometrischen Faktoren zum ERGUN-Koeffizienten  $A_E$  zusammengefasst. Nach TRUSSELL & CHANG (1999) müssen noch umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit verschiedenen porösen Materialien für einen großen Reynoldszahlenbereich durchgeführt werden, um ein robustes Verständnis der Tortuosität und des Flächen-Volumen-Formfaktors zu erhalten. Bereits vorhandene Werte für die Tortuosität und den Flächen-Volumen-Formfaktor beziehen sich auf Untersuchungen an regelmäßigen geometrischen Körpern wie Kugeln oder Kreisringen (NEMEC & LEVEC, 2005), so dass für die vorliegende Untersuchung keine Vergleichswerte verfügbar sind.

Aus diesem Grund werden die ERGUN-Koeffizienten aus den Messergebnissen, wie nachfolgend beschrieben, ermittelt. Abbildung 6.7 zeigt schematisch den Modellversuchsaufbau mit den Randbedingungen für die Durchströmung. Mit der Hochbehältersäule wird der Außenwasserstand eingestellt, welcher einen Durchfluss durch die drei Bereiche Aquifermaterial, Filterkies und Filterrohr hervorruft. Bei der Durchströmung findet ein Druckverlust statt, der

in Druckerbohrungen an verschiedenen Radien messtechnisch bestimmt wird. Der jeweils größere Wert ist  $h_{i,AM}$  und der kleinere Wert  $h_{j,AM}$  (vgl. Abbildung 6.7).

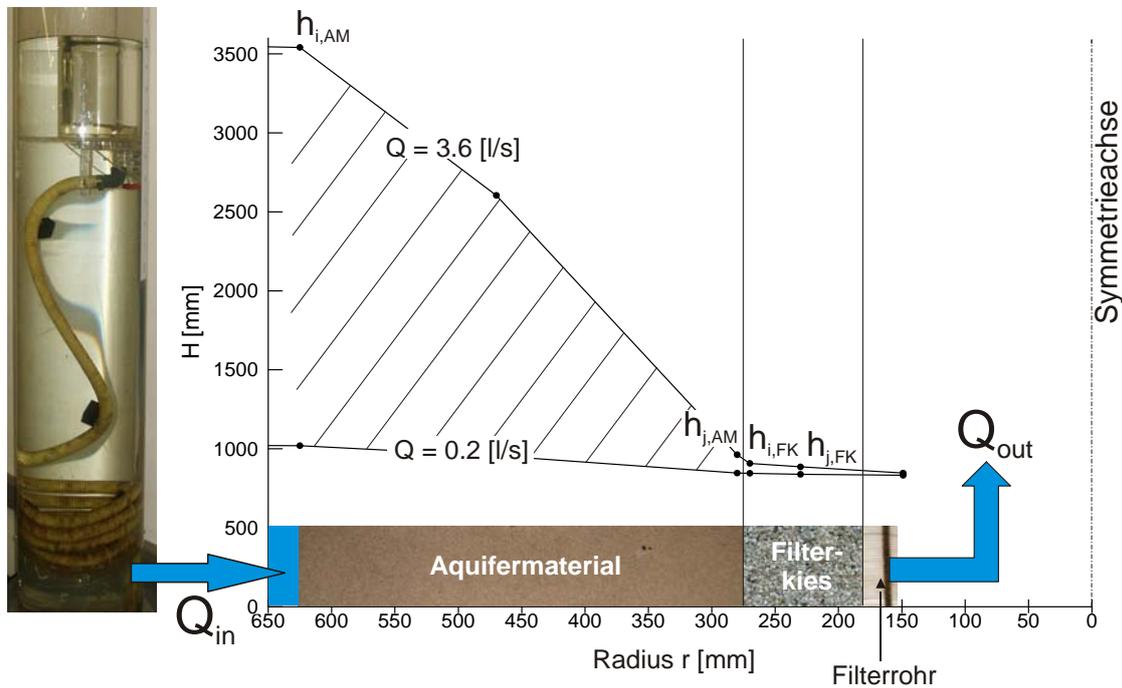


Abbildung 6.7: Druckmesswerte in Abhängigkeit vom Radius für den gemessenen Durchflussbereich einer Versuchskonfiguration mit Angabe der Randbedingungen

Für alle gemessenen Druckdifferenzen mit  $i > j$  im Aquifermaterial und den zugehörigen Durchflüssen wird aus Gleichung (6.2) mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach den folgenden Gleichungen (6.3) bis (6.5) der Parameter  $A_E$  für jede der 49 Versuchskonfiguration mit eingebautem Aquifermaterial bestimmt.

$$\left\| \left( h_{i,AM} - h_{j,AM} \right) - \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot \ln \left( \frac{r_{i,AM}}{r_{j,AM}} \right) \cdot a_F \right\|^2 = \min \quad (6.3)$$

$$a_F = \frac{\sum \left[ \left( h_{i,AM} - h_{j,AM} \right) \cdot \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot \ln \left( \frac{r_{i,AM}}{r_{j,AM}} \right) \right]}{\sum \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot \ln \frac{r_{i,AM}}{r_{j,AM}} \right)^2} \quad (6.4)$$

$$A_E = a_F \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{g \cdot d_w^2}{\nu} \quad (6.5)$$

Das Ergebnis dieser Berechnungen für die einzelnen Versuchskonfigurationen ist in Abbildung 6.8 dargestellt und findet sich in Tabelle B.1 im Anhang. Das Bestimmtheitsmaß

der Anpassung ist für alle 49 Versuchskonfigurationen größer als 0.99 und zeigt damit eine sehr gute Eignung der Brunnenformel als Regressionsmodell. Die Angaben der Abszisse in Abbildung 6.8 beziehen sich auf die Nummer der Versuchskonfiguration nach Tabelle 4.7 und Tabelle 4.8, wobei die Nummern der 15 Versuche ohne Aquifermaterial nicht abgebildet sind.

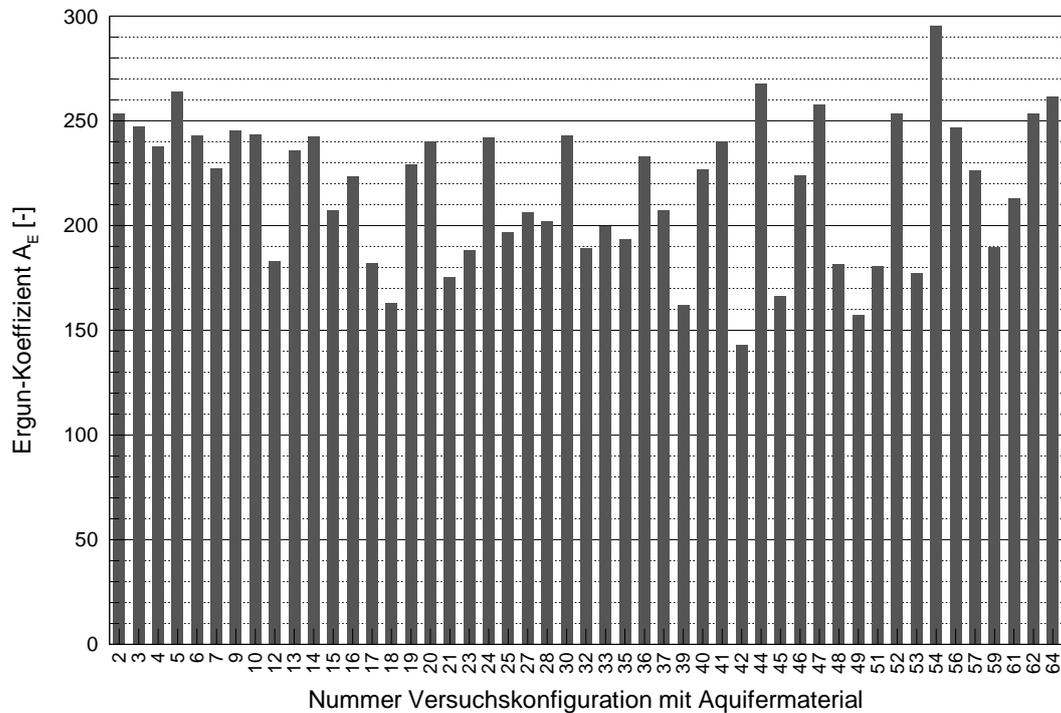


Abbildung 6.8: Berechnete ERGUN-Koeffizienten  $A_E$  für jede Versuchskonfiguration mit Aquifermaterial

Auffällig ist die relativ große Streuung der Werte in Abbildung 6.8. Da alle anderen Einflussfaktoren wie die Korngröße, die Porosität, die Viskosität und die Fließgeschwindigkeit bei der Ableitung des ERGUN-Koeffizienten nach Gleichung (6.3) bis (6.5) berücksichtigt wurden, verbleiben nur noch die Tortuosität und der Flächen-Volumen-Formfaktor als beeinflussende Parameter. Wie in Kapitel 2.3.2 dargestellt, sind dies Parameter der Mikrostruktur eines porösen Materials und ungeeignet für eine makroskopische Betrachtungsweise der Durchströmung poröser Medien. Wenn ein Versuchskörper unter gleichen Laborrandbedingungen wiederholend mit porösem Material gefüllt wird, so ist die mikroskopische Porenstruktur von einer Füllung zur nächsten nicht reproduzierbar (DAGAN, 1989).

Poröse Materialien bestehen aus Einzelkörnern, deren Partikelanordnung sich in der porösen Matrix aus der Entstehungsgeschichte einstellt. Dabei ist diese Entstehungsgeschichte entweder durch Naturprozesse oder, wie im vorliegenden Fall, technisch bedingt durch den manuellen Einbau der Materialien unter Laborbedingungen. Die sich aus dem Einbau ergebende Packungsstruktur ist ausgesprochen stochastischer Natur und zeigt sich indirekt in der Streuung

der ERGUN-Koeffizienten in Abbildung 6.8. SCHULER (1997) führt dafür eine neue Definition von Homogenität ein, nach der nicht gleichbleibende Parameterwerte sondern eine gleichbleibende Statistik der Parameterwerte die Bedingung für Homogenität darstellt. Das Befüllen und Verdichten des Versuchskörpers stellt somit auch bei gleichen Randbedingungen eine Unsicherheit dar, die durch eine zufällige und nicht deterministische Behandlung des ERGUN-Koeffizienten für die weitere Auswertung berücksichtigt wird.

Zunächst werden die ermittelten ERGUN-Koeffizienten der Stichprobe nach der Regel von FREEDMAN & DIACONIS (1981) in Klassen eingeteilt und die Wahrscheinlichkeitsdichte sowie die kumulative Verteilungsfunktion bestimmt (siehe Abbildung 6.9). Durch die Klasseneinteilung wird zwar die graphische Darstellung beeinflusst, sie hat jedoch keinen Einfluss auf die Ableitung einer Verteilungsfunktion.

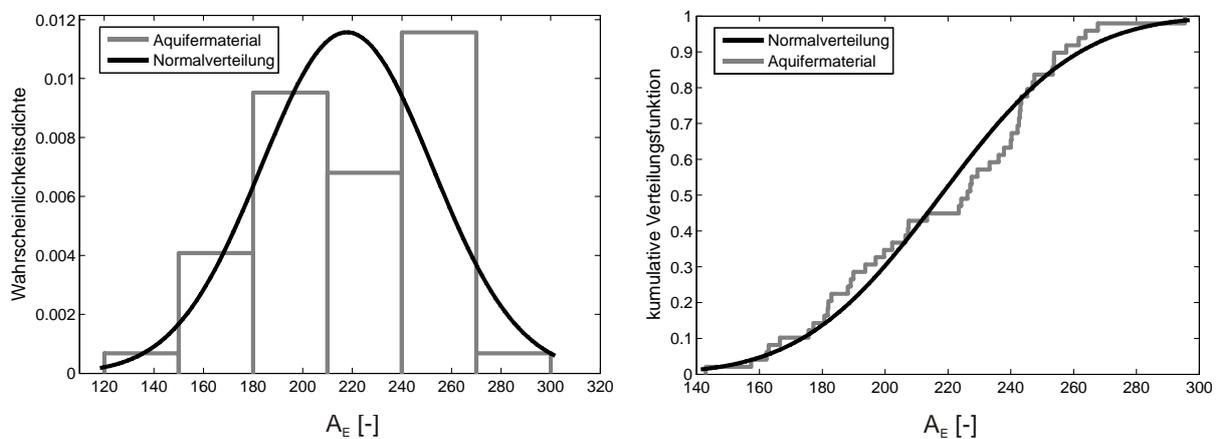


Abbildung 6.9: Wahrscheinlichkeitsdichte und kumulative Verteilungsfunktion der ermittelten linearen ERGUN-Koeffizienten für das Aquifermaterial mit geschätzter Normalverteilung

Basierend auf der Annahme, dass die ERGUN-Koeffizienten normalverteilt sind, werden die Parameter der jeweiligen Verteilungsfunktion mit der Maximum-Likelihood-Methode (erläutert beispielsweise in PLATE (1993) oder PAPULA (2008)) geschätzt. Nach LUMB (1966) sind die meisten Bodenparameter normalverteilt, während DAGAN (1989), FORKEL (2004) und STAUFFER (1998) für die im Raum variierende hydraulische Durchlässigkeit von einer Lognormalverteilung ausgehen. Da es jedoch bisher keine Untersuchung zur statistischen Verteilung der FORCHHEIMER- oder ERGUN-Koeffizienten gibt und der vorliegende Stichprobenumfang von 49 relativ klein ist, wird eine Normalverteilung gewählt.

Als statistisches Prüfverfahren zur Güte der Anpassungsfunktion wird der KOLMOGOROW-SMIRNOW-Test nach MASSEY (1952) durchgeführt. Der KOLMOGOROW-SMIRNOW-Anpassungstest ist auch für einen geringen Stichprobenumfang geeignet und wird verwendet, um zu überprüfen, ob Stichprobenwerte der angenommenen Verteilungsfunktion folgen (MASSEY, 1952). Mit einem Signifikanzniveau von 5 % wird ermittelt, dass die Normalvertei-

lung als richtig gewählter Verteilungstyp angesehen werden kann. Somit lassen sich mit der Maximum-Likelihood-Methode die benötigten Parameter der Verteilungsfunktion aus den vorliegenden Stichprobenwerten für den ERGUN-Koeffizienten ermitteln (vgl. Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Parameter der geschätzten Normalverteilung des linearen ERGUN-Koeffizienten im Aquifermaterial

Parameter	Mittelwert	Standardabweichung	Stichprobenumfang
$A_E$	217.80	34.48	49

### 6.3.2 Filterkies

Entsprechend dem im Filterkies vorherrschenden Reynoldszahlenbereich wird für den Strömungsprozess in diesem porösen Material die FORCHHEIMER-Gleichung zugrunde gelegt. Angewendet auf die radiale Brunnenströmung im nichtlinear laminaren Bereich nach Gleichung (3.19) ergibt sich die folgende Gleichung (6.6) für den Druckverlust mit dem nach TRUSSELL & CHANG (1999) erweiterten Konzept des Hydraulischen Radius aus Gleichung (2.21):

$$H - h = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \left[ A_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) + B_E \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_w} \cdot \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right) \right]. \quad (6.6)$$

Werden die ERGUN-Koeffizienten  $A_E$  und  $B_E$  mit der Porositätsfunktion und dem Korngrößenterm durch die FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  und  $b_F$  zusammengefasst, so erhält man das folgende Minimierungsproblem bei Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit der Auflösung der Normalgleichungen (siehe Gleichungen (6.7) bis (6.11)). Die Randbedingungen für die Durchströmung des Filterkieses werden wie in Abbildung 6.7 mit  $i > j$  eingesetzt.

$$\left\| \left( h_{i,FK} - h_{j,FK} \right) - \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot a_F - \left( \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m} \right)^2 \cdot b_F \right\|^2 = \min \quad (6.7)$$

Substitution :

$$q = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m}$$

$$\Delta h_{FK} = (h_{i,FK} - h_{j,FK})$$

$$a_F = \frac{\sum (q \cdot \Delta h_{FK})}{\sum q^2} - \frac{\sum q^3}{\sum q^2} \cdot \left( \frac{\sum (q^2 \cdot \Delta h_{FK}) \cdot \sum q^2 - \sum q^3 \cdot \sum (q \cdot \Delta h_{FK})}{\sum q^4 \cdot \sum q^2 - \sum q^3 \cdot \sum q^3} \right) \quad (6.8)$$

$$b_F = \frac{\sum (q^2 \cdot \Delta h_{FK}) \cdot \sum q^2 - \sum q^3 \cdot \sum (q \cdot \Delta h_{FK})}{\sum q^4 \cdot \sum q^2 - \sum q^3 \cdot \sum q^3} \quad (6.9)$$

$$A_E = a_F \cdot \frac{g \cdot d_w^2}{\nu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{\ln \left( \frac{r_{i,FK}}{r_{j,FK}} \right)} \quad (6.10)$$

$$B_E = b_F \cdot \frac{g \cdot d_w}{\left( \frac{1}{r_{j,FK}} - \frac{1}{r_{i,FK}} \right)} \cdot \frac{n^3}{(1-n)} \quad (6.11)$$

Die Gleichung (6.6) ist nur für gegebene Randbedingungen lösbar. Das bedeutet für die vorliegende Untersuchung, dass nur bei Versuchskonfigurationen mit mindestens zwei Messpunkten im Filterkies eine Druckdifferenz und somit eine gültige Randbedingung für die Gleichung (6.6) vorliegt. Daher beschränkt sich die Anzahl der Versuche, die zur Bestimmung der ERGUN-Koeffizienten verwendet werden können, auf 17 und beinhaltet als Schüttmaterialien die vier Hauptfilterkiese und die Glaskugeln.

Die Ergebnisse der berechneten ERGUN-Koeffizienten für die Filterkiese und Glaskugeln zeigt Abbildung 6.10, wobei sich die zugehörigen Einzelergebnisse mit Angabe des Bestimmtheitsmaßes im Anhang in Tabelle B.2 befinden. Für alle Minimierungsprobleme ist das Bestimmtheitsmaß der Fehlerquadratminimierung größer als 0.96. Wie beim Aquifermaterial (vgl. Kapitel 6.3.1) wird auch für die ERGUN-Koeffizienten im Filterkies ein statistisches Verfahren zur Ableitung einer Verteilungsfunktion aus den Einzelergebnissen angewendet. Dabei wird unterschieden zwischen den Versuchen mit Glaskugeln oder Filterkiesen als Schüttmaterial. Dies wird damit begründet, dass sich aufgrund der Kornform und der Erfahrungen beim Einbau der Materialien unterschiedliche Packungsstrukturen bei den beiden Materialtypen einstellen. Die Glaskugeln lassen sich nicht verdichten, sondern werden in eine gleichmäßig dichte Lagerung geschüttet. Im Gegensatz dazu wird der Filterkies jeweils nach ca. 5 cm Schütthöhe verdichtet (vgl. Kapitel 4.6.1). Aufgrund der unregelmäßigen Kornform stellt sich, verglichen mit den Glaskugeln, eine geschichtete Packungsstruktur ein. Die Filterkiese können als eine Gruppe aufgefasst werden, da sie sich nur in der Kornverteilung und Korngruppe, nicht jedoch in der Materialart, aufgrund der gleichen Lagerstättenherkunft unterscheiden. Die Kornverteilung und Korngruppe wird bereits durch die Ermittlung des wirksamen Korndurchmessers  $d_w$  nach Gleichung (4.5) berücksichtigt.

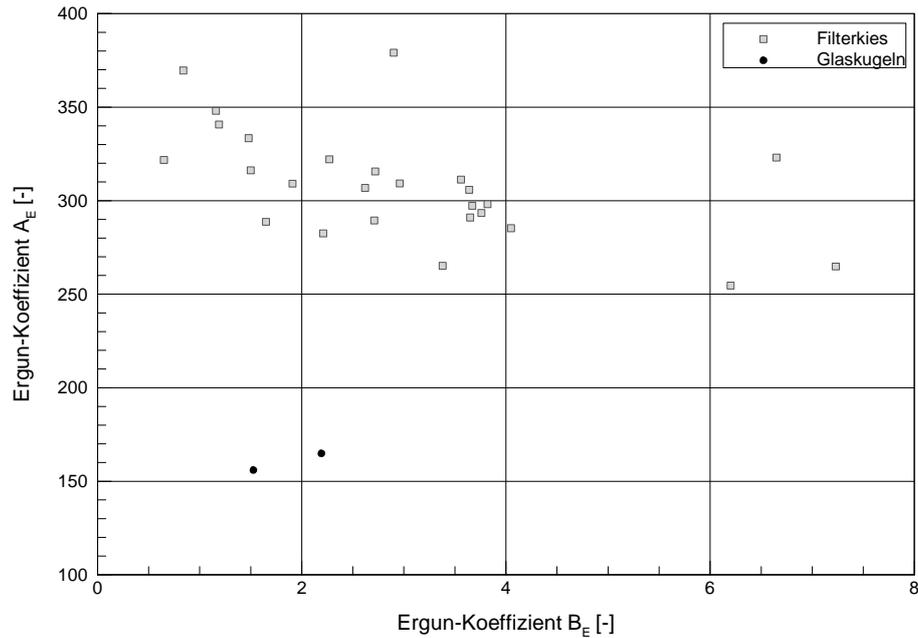


Abbildung 6.10: Berechnete ERGUN-Koeffizienten  $A_E$  und  $B_E$  für Filterkiese und Glaskugeln als Filterkiese

Somit ergibt sich nach Klasseneinteilung und Annahme einer Normalverteilung der Stichprobenwerte die folgende Abbildung 6.11 der Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion für die ERGUN-Koeffizienten der untersuchten Filterkiese.

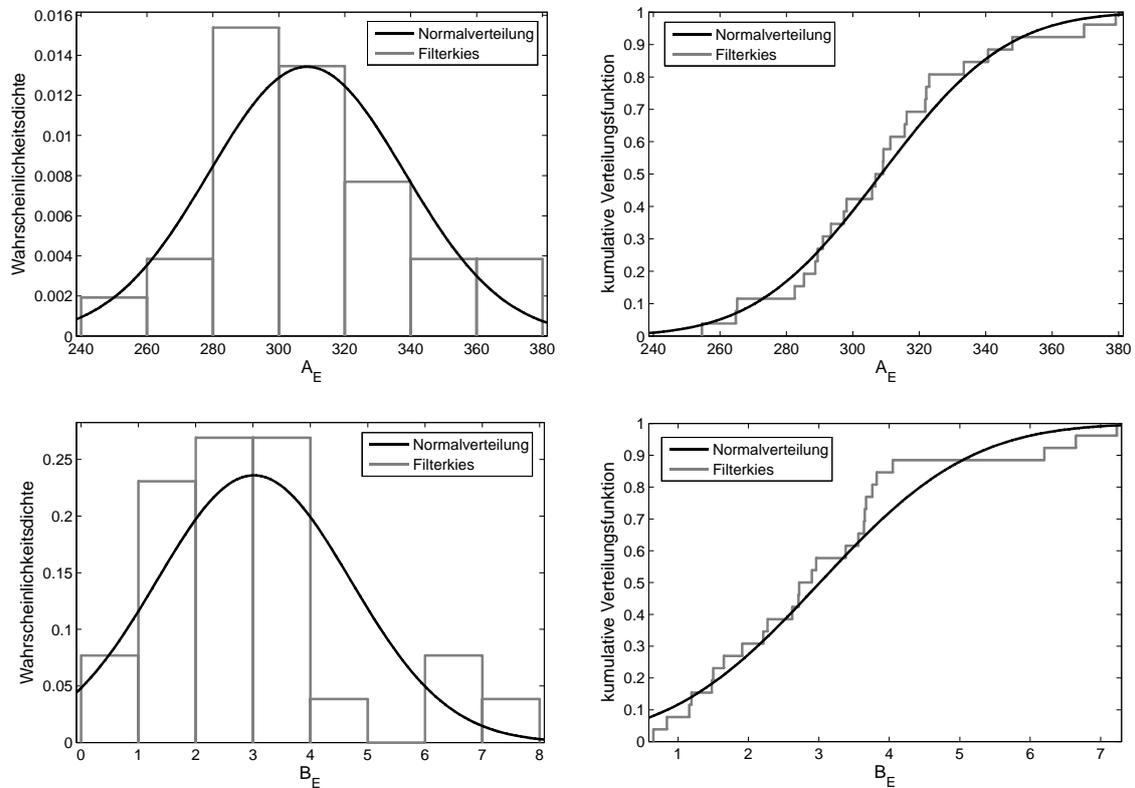


Abbildung 6.11: Wahrscheinlichkeitsdichte und kumulative Verteilungsfunktion der ermittelten linearen und nichtlinearen ERGUN-Koeffizienten für die Filterkiese mit geschätzter Normalverteilung

Nach durchgeführtem KOLMOGOROW-SMIRNOW-Test wird bei einem Signifikanzniveau von 5 % die Annahme einer Normalverteilung sowohl für den linearen ERGUN-Koeffizienten  $A_E$  als auch für den nichtlinearen ERGUN-Koeffizienten  $B_E$  der Filterkiese bestätigt.

Da der Stichprobenumfang mit nur zwei Versuchen mit Glaskugeln als Filterkies zu gering für eine gesicherte statistische Auswertung ist, wird eine Parameterschätzung hierfür zunächst nicht vorgenommen. Die mit der Maximum-Likelihood-Methode geschätzten Parameter der Normalverteilung sind für den Filterkies in der Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Tabelle 6.4: Parameter der geschätzten Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten für Filterkies

Material	$A_E$ [-]	$\sigma_{AE}$ [-]	$B_E$ [-]	$\sigma_{BE}$ [-]	Stichprobenumfang
Filterkies	308.54	29.71	3.01	1.69	26

### 6.3.3 Filterrohr

Das Filterrohr wird als poröses Medium nach SINGH & SHAKYA (1989) aufgefasst (vgl. Kapitel 3.5.1). Diese Annahme wird dadurch begründet, dass ein Teil der verwendeten Filterrohre mit Kieskörnern beklebt ist. Somit sind keine definierten Filterschlitz vorhanden, für welche die Modellvorstellung der Aufsummierung von Einzelverlusten anwendbar ist. Für den Exponenten  $s$  in Gleichung (3.27) wird der quadratische Ansatz mit  $s=2$  verwendet. Die radiale Anströmung führt zu deutlich erhöhten Fließgeschwindigkeiten am Filterrohr, so dass die Druckverluste für Reynoldszahlen größer 1 mit dem quadratischen Term der FORCHHEIMER-Gleichung berechnet werden können (siehe Gleichung (6.12)). Für die durchgeführten Versuche wird aus der gemessenen Druckdifferenz  $\Delta h_{FR}$  anhand des jeweils erreichten Durchflusses  $Q$  die Filterrohrdurchlässigkeit  $k_{FR}$  durch Fehlerquadratminimierung ermittelt (siehe Gleichung (6.13) und (6.14)) und in Tabelle 6.5 zusammengestellt.

$$\Delta h_{FR} = \frac{b_{FR}}{(2\pi \cdot r_{Br} \cdot k_{FR} \cdot m)^2} Q^2 \quad (6.12)$$

$$\Rightarrow \frac{(h_{FR} - h_{Br})}{b_{FR}} = \left( \frac{Q}{2\pi \cdot r_{Br} \cdot k_{FR} \cdot m} \right)^2$$

$$\left\| \frac{(h_{FR} - h_{Br})}{b_{FR}} - \left( \frac{Q}{2\pi \cdot r_{Br} \cdot k_{FR} \cdot m} \right)^2 \right\|^2 = \min \quad (6.13)$$

$$\frac{1}{k_{FR}^2} = \frac{\sum \left[ \frac{(h_{FR} - h_{Br})}{b_{FR}} \cdot \frac{Q^2}{(2\pi \cdot r_{Br} \cdot m)^2} \right]}{\sum \left( \frac{Q^2}{(2\pi \cdot r_{Br} \cdot m)^2} \right)^2} \quad (6.14)$$

Tabelle 6.5: Berechnete Filterrohrdurchlässigkeiten durch Minimierung der Fehlerquadratsumme

Filterrohr	DN [mm]	Schlitz-/ Spaltweite [mm]	Kornfraktion der Beklebung [mm]	$k_{FR}$ [m/s]	$R^2$
SBF	300	2.5	3-5	$7.85 \cdot 10^{-3}$	0.947
SBF	300	3.5	4-7	$9.40 \cdot 10^{-3}$	0.950
SBF	300	1.0	-	$5.62 \cdot 10^{-3}$	0.931
KLF	300	-	3-5	$4.93 \cdot 10^{-3}$	0.982
KLF	300	-	4-7	$7.04 \cdot 10^{-3}$	0.979
KSF	300	-	3-5	$9.97 \cdot 10^{-3}$	0.919
KSF	300	-	4-7	$1.11 \cdot 10^{-2}$	0.945
KSF <sub>Hobas</sub>	300	-	4-7	$8.43 \cdot 10^{-3}$	0.972
KSF	400	-	3-5	$7.71 \cdot 10^{-3}$	0.920
WDF	300	0.5	-	$5.26 \cdot 10^{-3}$	0.950
WDF	300	0.8	-	$5.28 \cdot 10^{-3}$	0.919
WDF	300	1.0	-	$5.00 \cdot 10^{-3}$	0.945
WDF	400	0.5	-	$4.00 \cdot 10^{-3}$	0.905
SF	300	0.5-1.5	-	$1.03 \cdot 10^{-2}$	0.895
SF	400	0.5	-	$8.34 \cdot 10^{-3}$	0.749

### 6.3.4 Vergleich der Koeffizienten mit Literaturwerten

Ein Vergleich der berechneten FORCHHEIMER-Koeffizienten aus den einzelnen Versuchskonfigurationen mit Literaturwerten, dargestellt in Abhängigkeit von dem jeweiligen Korndurchmesser, zeigt die Abbildung 6.12 für  $a_F$  und die Abbildung 6.13 für  $b_F$ . Eine Zusammenstellung der Datengrundlage aus der Literatur enthält Tabelle 6.6.

Da bei vielen Untersuchungen die Porosität und die Viskosität nicht angegeben sind, werden zunächst nur die dimensionsbehafteten FORCHHEIMER-Koeffizienten und nicht die dimensionslosen ERGUN-Koeffizienten miteinander verglichen. Neben den berechneten FORCHHEI-

MER-Koeffizienten der Filterkiese werden auch die Ergebnisse des linearen FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  des Aquifermaterials mit Literaturwerten verglichen.

Tabelle 6.6: Zusammenstellung der Datengrundlage für Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13

Autor	Material	Re-Bereich	Anzahl Werte
MACDONALD et al. (1979)	Glaskugeln, Sand	$10^{-3} - 10^4$	44
THIRUVENGADAM & KUMAR (1997)	Glaskugeln, Kies	300 - 7000	10
CHANG et al. (1999)	Sand, Glaskugeln	0.1 - 50	30
WAHYUDI et al. (2002)	Sand	0.1 - 100	5
YAMADA et al. (2005)	Kies	0.563 - 414	4
REDDY (gesammelt)	Kies	1.2 - 18	152
SIDIROPOULOU et al. (2007)	Sand, Kies, Glaskugeln	-	127
MOUTSOPOULOS et al. (2009)	Sand, Kies	1.15 - 2709	8

Die Datenbasis umfasst neben künstlichen Materialien wie zum Beispiel Glaskugeln, welche gesondert aufgeführt sind, natürliches Material wie Sand oder Kies. SIDIROPOULOU et al. (2007) haben umfangreiche Angaben zu den FORCHHEIMER-Koeffizienten aus Veröffentlichungen zusammengetragen. Von der Arbeitsgruppe um REDDY und RAO (REDDY, 2006; REDDY & RAO, 2004; VENKATARAMAN & RAO, 2000; REDDY & RAO, 2006) wurden zahlreiche Untersuchungen an einem Permeameter mit konvergierenden Rändern durchgeführt. Die Defizite in der Auswertung der Arbeitsgruppe um REDDY und RAO sind in Kapitel 3.7 dargestellt.

Als Wertebereich für den Korndurchmesser sind Daten zwischen 0.1 mm und 100 mm vorhanden. Der FORCHHEIMER-Koeffizient  $a_F$  variiert zwischen 0.1 s/m und  $10^5$  s/m, während der FORCHHEIMER-Koeffizient  $b_F$  zwischen  $1 \text{ s}^2/\text{m}^2$  und  $10^6 \text{ s}^2/\text{m}^2$  liegt. Da der Wertebereich in den beiden Abbildungen somit viele Größenordnungen umfasst, werden die Achsen logarithmisch dargestellt.

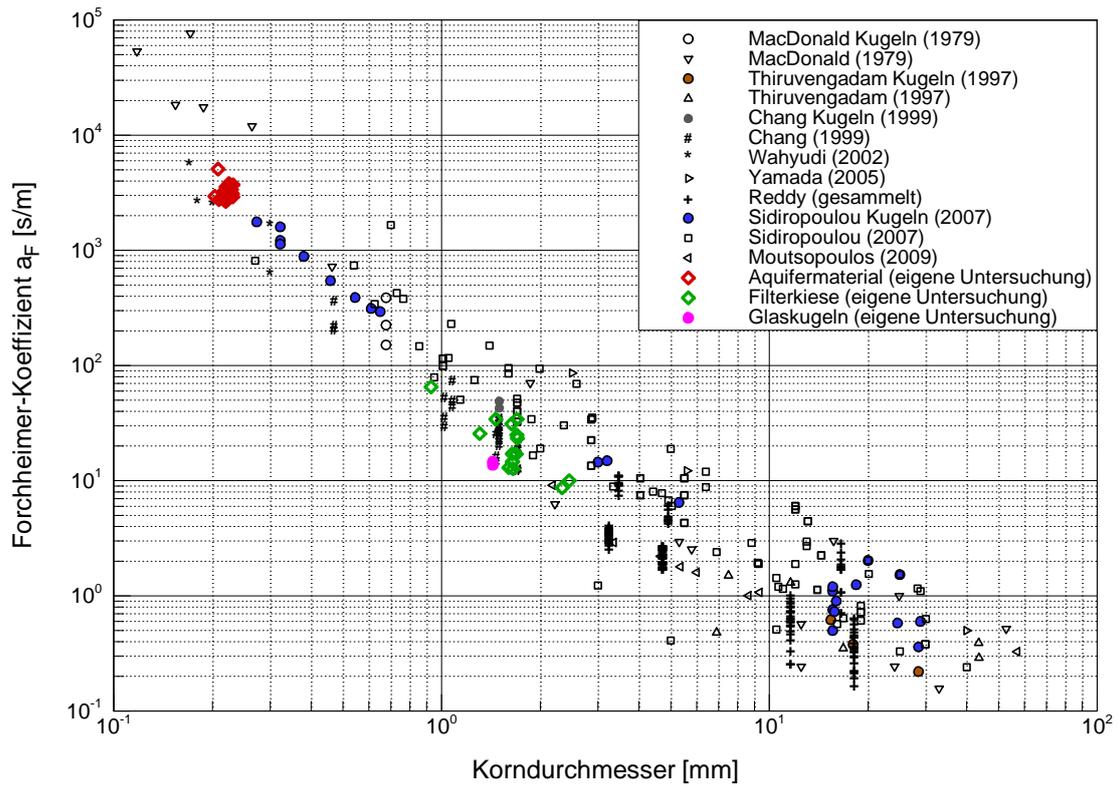


Abbildung 6.12: Berechnete FORCHHEIMER-Koeffizienten  $a_F$  und Literaturwerte für verschiedene Korndurchmesser

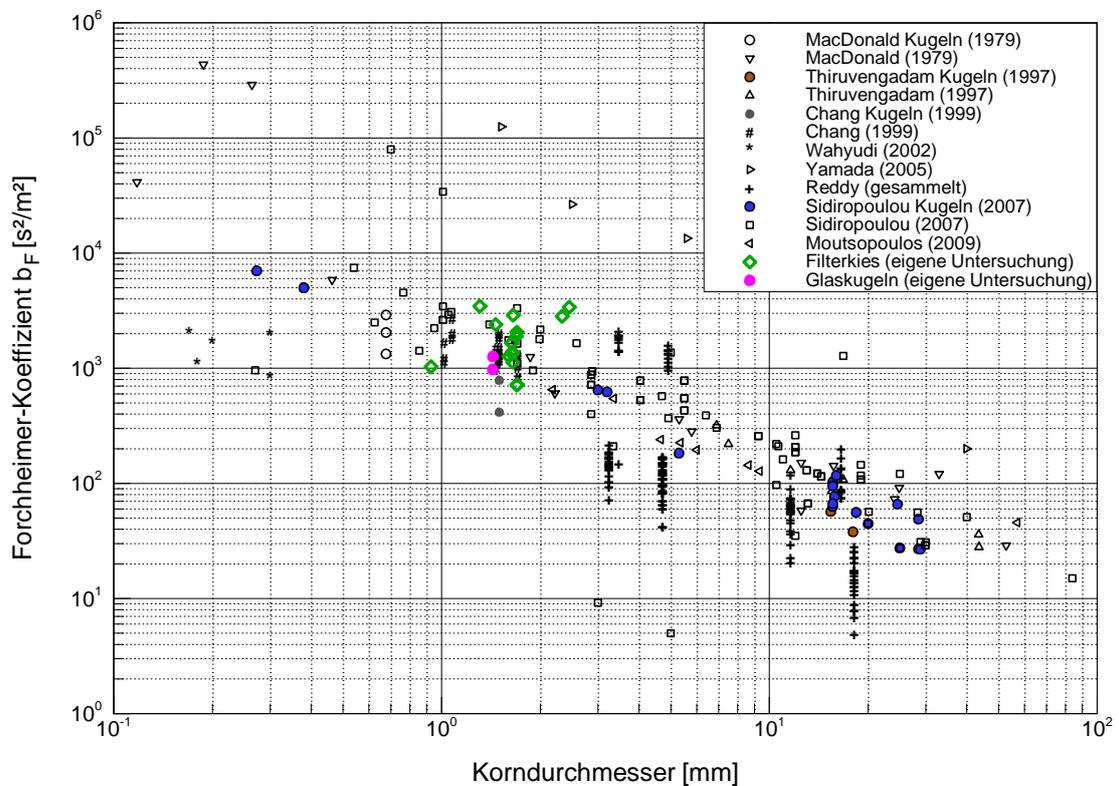


Abbildung 6.13: Berechnete FORCHHEIMER-Koeffizienten  $b_F$  und Literaturwerte für verschiedene Korndurchmesser

Beide FORCHHEIMER-Koeffizienten werden mit zunehmendem Korndurchmesser kleiner (Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13). Die durch Fehlerquadratminimierung berechneten Parameter der eigenen Untersuchung für die Filterkiese fügen sich sehr gut in die vorhandene Datenbasis ein. Die berechneten Werte für das Aquifermaterial passen ebenfalls gut zur gesamten Datenbasis. Die gesammelten Werte von REDDY zeigen für jedes untersuchte Material eine große Bandbreite, da die Auswertungen auf einer Gradientenbetrachtung basieren, die für radiale Strömungssysteme nicht zielführend ist. In Kapitel 3.7 wird daher ausgeführt, dass zwangsläufig variierende Forchheimer-Koeffizienten ermittelt werden müssen. Diese Streuung ist sehr gut anhand der Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 nachzuvollziehen.

Eine allgemeine Ableitung von Koeffizienten für verschiedene Korngruppen aus den FORCHHEIMER-Koeffizienten ist nicht möglich, weil diese Koeffizienten dimensionsbehaftet sind und von der Korngröße und der Porosität abhängen. Daher werden aus der Datengrundlage in Tabelle 6.6 diejenigen Untersuchungen herausgefiltert, bei denen zusätzlich Angaben zur Korngröße und Porosität vorhanden sind, um aus diesen Untersuchungen dimensionslose ERGUN-Koeffizienten mit dem erweiterten Konzept des Hydraulischen Radius zu berechnen und einen neuen Vergleich mit den eigenen Werten durchzuführen. Zusätzlich werden Literaturangaben zu den häufig untersuchten und modifizierten ERGUN-Koeffizienten von Kugeln berücksichtigt (REICHELDT, 1972; FAND et al., 1987; BURCHARTH & ANDERSEN, 1995; YU et al., 2002; NIVEN, 2002; OZAHİ et al., 2008).

Ein Vergleich der ERGUN-Koeffizienten ausgewählter Literaturwerte mit den im Rahmen dieser Arbeit berechneten Koeffizienten enthält Abbildung 6.14 für geometrisch gleichförmige Körper wie Kugeln. Die beiden in Kapitel 6.3.2 berechneten Parameter der eigenen Stichprobe sind in der Abbildung dargestellt. Der Vergleich der ERGUN-Koeffizienten für Kugeln zeigt, dass die ermittelten Werte der eigenen Versuche mit Glaskugeln gut mit vergleichbaren Untersuchungsergebnissen übereinstimmen, lediglich der nichtlineare ERGUN-Koeffizient  $B_E$  ist für den einen Versuch größer als die Vergleichswerte. Insgesamt zeigt Abbildung 6.14 eine Bandbreite möglicher ERGUN-Koeffizienten, die sich durch die zufällige Packungsstruktur erklären lässt. Ein weiterer Einflussfaktor für die Streuung der Literaturwerte in Abbildung 6.14 ist die Nichtberücksichtigung von Wandeffekten, welche die Ergebnisse bei Säulenversuchen beeinflussen (EISFELD & SCHNITZLEIN, 2001). Aufgrund des Modellkonzeptes der eigenen Untersuchungen (vgl. Kapitel 4.2) sind keine Wandeffekte bei der Auswertung zu berücksichtigen. Da aus den eigenen Untersuchungen nur zwei Ergebnisse für Glaskugeln vorliegen, werden für eine statistische Auswertung die Literaturwerte aus Abbildung 6.14 mit herangezogen, so dass eine ausreichend große Stichprobe zur Verfügung steht. Unter Annahme einer Normalverteilung ergeben sich die Wahrscheinlichkeitsdichten und Verteilungsfunktionen für die ERGUN-Koeffizienten von Glaskugeln nach Abbildung 6.15.

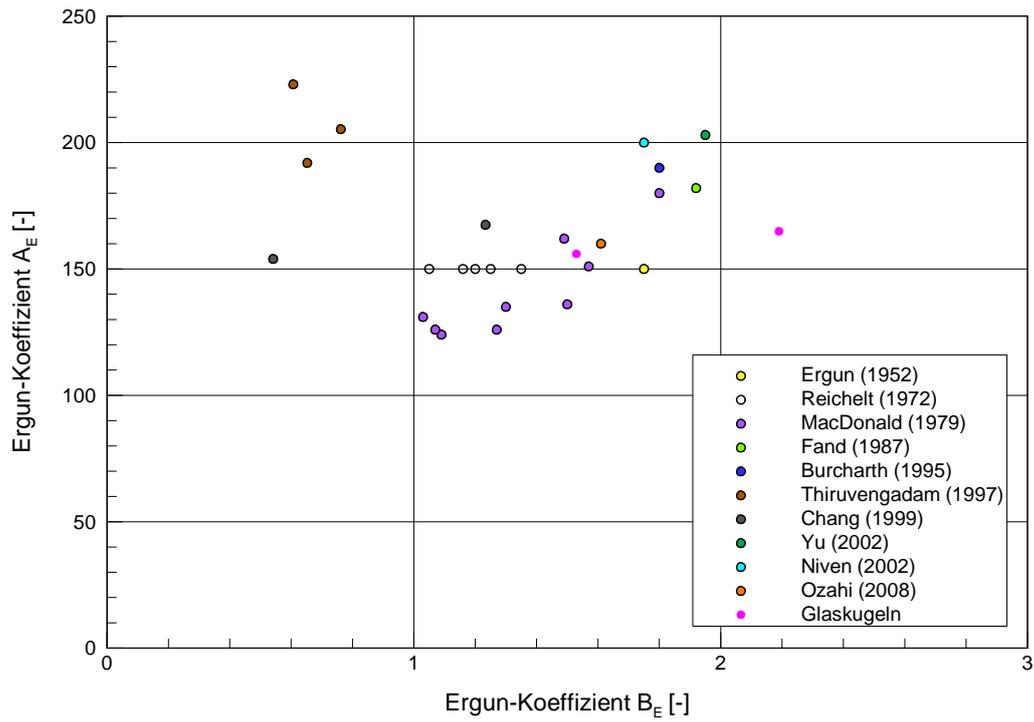


Abbildung 6.14: ERGUN-Koeffizienten aus Versuchsergebnissen und Literaturwerten für geometrisch gleichförmige Körper (Kugeln)

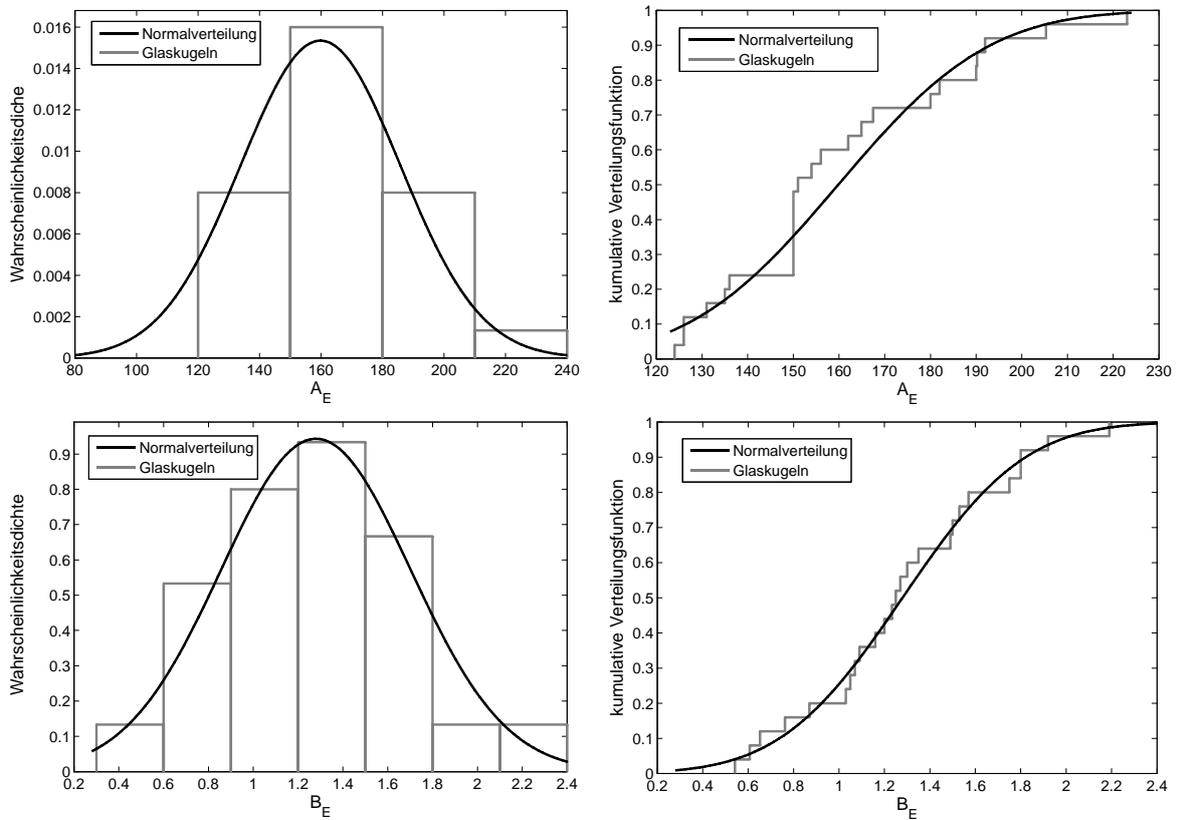


Abbildung 6.15: Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion mit geschätzter Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten für Glaskugeln aus eigener Untersuchung, ergänzt mit Literaturwerten

Der durchgeführte KOLMOGOROW-SMIRNOW-Anpassungstest bestätigt bei einem Signifikanzniveau von 5 % die Annahme einer Normalverteilung, so dass sich die folgenden geschätzten Parameter für die ERGUN-Koeffizienten von Glaskugeln anhand eigener Untersuchungen ergänzt mit Literaturwerten ergeben (vgl. Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Parameter der geschätzten Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten für Glaskugeln

Material	$A_E$ [-]	$\sigma_{AE}$ [-]	$B_E$ [-]	$\sigma_{BE}$ [-]	Stichprobenumfang
Glaskugeln	159.8	26.0	1.28	0.42	25

Eine deutlich größere Bandbreite der ERGUN-Koeffizienten zeigt die Abbildung 6.16 für Untersuchungen an ungleichförmigen porösen Materialien wie Sand oder Kies. Die geschätzten Parameter der Verteilungsfunktion der eigenen Stichprobe (vgl. Kapitel 6.3.2) sind in der Abbildung dargestellt. Der lineare ERGUN-Koeffizient  $A_E$  variiert insgesamt zwischen 0 und 950, während der Wertebereich für den nichtlinearen ERGUN-Koeffizient  $B_E$  von 0 bis 17 reicht. Die eigenen Untersuchungen passen sich sehr gut in die vorhandene Datenbasis ein, da der lineare ERGUN-Koeffizient  $A_E$  sowohl für das Aquifermaterial als auch für die untersuchten Filterkiese im Bereich der meisten Literaturwerte liegt. Ebenso deckt die geschätzte Verteilungsfunktion für den nichtlinearen ERGUN-Koeffizienten  $B_E$  die Bandbreite der meisten Literaturwerte gut ab. Die Unsicherheit in Form der Standardabweichung der Parameter liegt ebenfalls im Bereich der Literaturwerte.

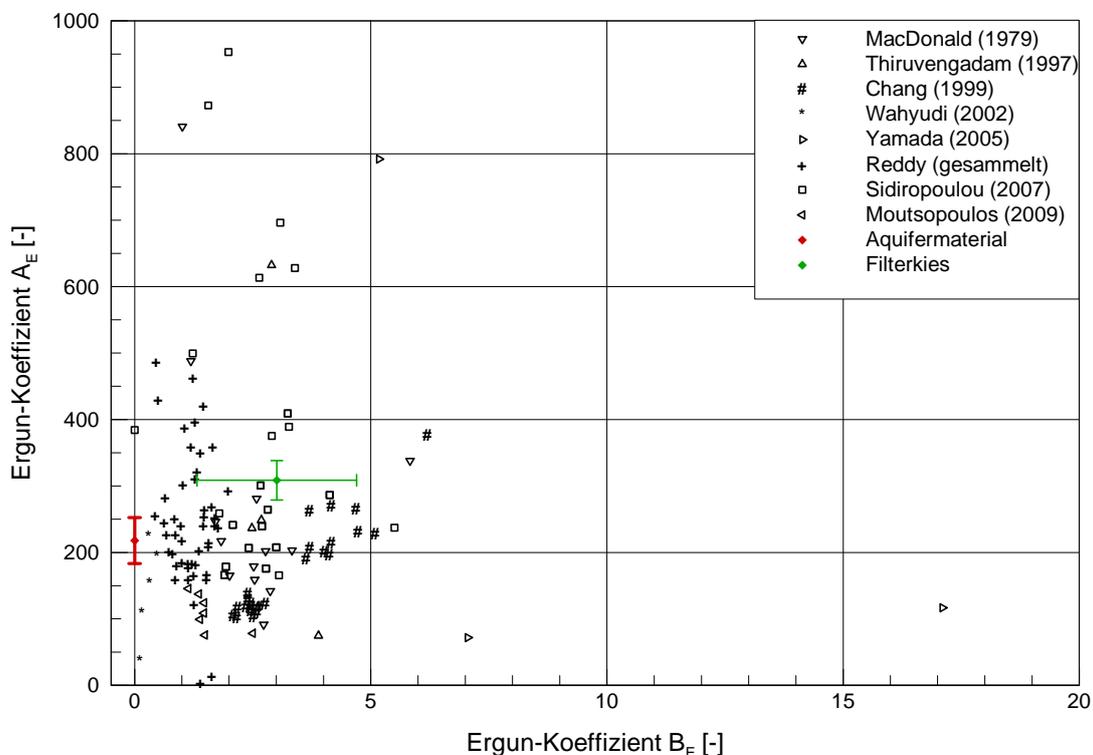


Abbildung 6.16: ERGUN-Koeffizienten aus Versuchsergebnissen und Literaturwerten für geometrisch ungleichförmige Körper (Sand, Kies)

Die Bandbreite der ERGUN-Koeffizienten für ungleichförmige poröse Medien ist im Vergleich zu den Kugelergebnissen deutlich größer. Bisher ist nach OZAHİ et al. (2008) nur bekannt, dass die ERGUN-Koeffizienten für ungleichförmige poröse Materialien im Vergleich zu den Koeffizienten von Kugeln angepasst werden müssen, aber die Art und Weise der Anpassung ist noch nicht ausreichend erforscht (TRUSSELL & CHANG, 1999).

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen hat die Packungsstruktur einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Zwar ist die Lagerungsdichte durch die vorgegebene Einbauprozedur relativ konstant, aber durch den schichtweisen Materialeinbau mit anschließender Verdichtung ergeben sich unterschiedliche Packungsstrukturen. Welche mikroskopische Partikelorientierung sich daraus einstellt und welchen Einfluss diese auf die makroskopische strömungswirksame Porosität hat, kann nicht durch einen funktionalen Zusammenhang aus den Versuchen quantifiziert werden. Durch den lagenweisen Einbau entstehen somit zufällige Verteilungen heterogener Packungsstrukturen im Aquifermaterial und im Filterkies, für die die Verteilungsparameter anhand einer angenommenen Normalverteilung geschätzt werden. Aus den eigenen Untersuchungen sind für die verwendeten Materialien somit statistische Parameter vorhanden und in Tabelle 6.8 zusammengefasst, mit denen eine probabilistische Betrachtungsweise zur Berücksichtigung der Parameterstreuung für die weitere Auswertung möglich ist.

Tabelle 6.8: Parameter der geschätzten Normalverteilung der ERGUN-Koeffizienten

Material	$A_E$ [-]	$\sigma_{AE}$ [-]	$B_E$ [-]	$\sigma_{BE}$ [-]	Stichprobenumfang
Aquifermaterial	217.80	34.48	-	-	49
Filterkies	308.54	29.71	3.01	1.69	26
Glaskugeln	159.83	25.99	1.28	0.42	25

Die experimentell ermittelten Durchlässigkeiten der Filterrohre werden mit Literaturwerten nach SINGH & SHAKYA (1989), KLOTZ (1969) und GARG & LAL (1971) verglichen, da für diese Untersuchungen Werte zur Filterrohrdurchlässigkeit angegeben sind. Alle Ergebnisse basieren auf der Modellvorstellung, dass das Filterrohr als poröses Medium mit einer definierten Durchlässigkeit angesehen werden kann. Dargestellt in Abbildung 6.17 werden die Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von den jeweiligen freien Durchtrittsflächen der Filterrohre.

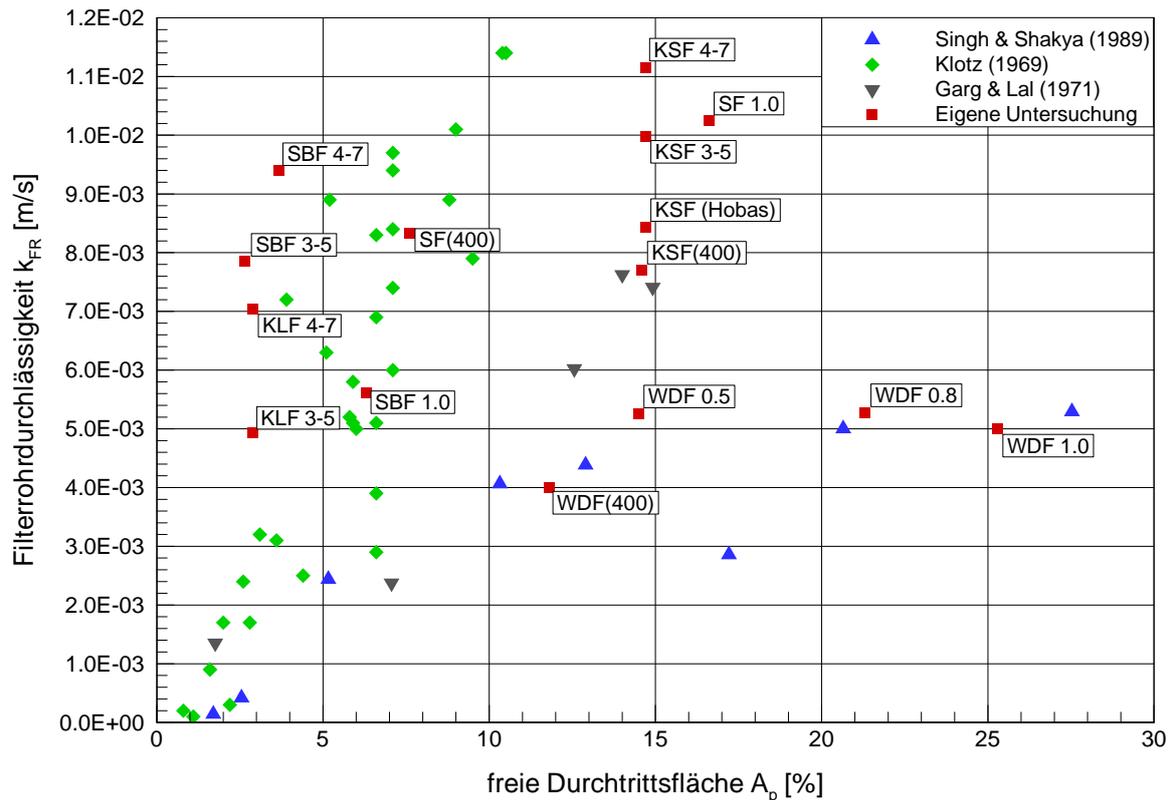


Abbildung 6.17: Experimentell ermittelte Filterrohrdurchlässigkeiten  $k_{FR}$  aus eigener Untersuchung und nach SINGH & SHAKYA (1989), KLOTZ (1969) und GARG & LAL (1971)

KLOTZ (1969) untersucht die Filterrohre nur im linear laminaren DARCY-Bereich, während SINGH & SHAKYA (1989) und GARG & LAL (1971) von einem nichtlinearen Regimebereich ausgehen. Die Auswertung der bei der vorliegenden Untersuchung ermittelten Reynoldszahlen am Filterrohr (vgl. Abbildung 6.5) zeigt, dass bei den meisten Versuchen mit zunehmendem Durchfluss die Reynoldszahl im nichtlinear laminaren Übergangsbereich liegt. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sowohl KLOTZ (1969) als auch SINGH & SHAKYA (1989) nur geschlitzte Stahlfilterrohre untersucht haben. GARG & LAL (1971) verwenden auch Stahlfilterrohre, die allerdings mit runden Lochungen versehen sind. Außerdem ist das Filterrohr bei GARG & LAL (1971) im Untersuchungstank von einer Filterkiesschicht umgeben, die die Filterrohrentrittsfläche geringfügig reduziert. Die Filterrohre bei SINGH & SHAKYA (1989) werden mit relativ großen Schlitzten und daraus resultierend großen freien Durchtrittsflächen ausgeführt. Diese Filterrohre werden abschließend mit einem Drahtgewebe umwickelt, damit kein Feinmaterial durch die großen Schlitzte eindringen konnte. Die Reduzierung der freien Durchtrittsfläche durch das Drahtgewebe wird bei der Auswertung aber nicht berücksichtigt. Nach KOCH et al. (1967) kann zwar der Einfluss eines Drahtgewebes durch einen Produktansatz berücksichtigt werden, da jedoch keine weiteren Angaben zum Drahtgewebe vorhanden sind, wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Die Streuung der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werte begründet sich durch die Vielfalt der untersuchten Filterrohre. Für die zusammengesetzten Filterrohre aus Trägerrohr und Kiesbeklebung ist die freie Durchtrittsfläche nicht durch einfache geometrische Beziehungen zu ermitteln. Die in Tabelle 4.1 angegebenen Werte zur freien Durchtrittsfläche basieren daher auf geometrischen Berechnungen der RWE Power AG. Insgesamt zeigt sich, dass neben der freien Durchtrittsfläche auch der Filterrohrtyp und damit die Öffnungsgeometrie einen Einfluss auf die Durchlässigkeit hat. Die Wickeldrahtfilter zeigen im Verhältnis zu den anderen Filterrohren eine große freie Durchtrittsfläche, aber dafür eine geringe Durchlässigkeit. Dieser Filterrohrtyp hat allerdings auch die geringste Wanddicke von allen im Brunnenfiltermodell untersuchten Filterrohren, so dass zum Beispiel bei gleichem Druckverlust der Gradient bei einem Wickeldrahtfilter größer als bei einem Kiesstabfilter ist. Der Kiesstabfilter hingegen weist eine große Wanddicke auf und hat keine definierte Spaltgeometrie wie der Wickeldrahtfilter, sondern eine poröse Kiesbeklebung. Die Ergebnisse der untersuchten Schlitzbrückenfilter sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Stahlfilterrohre von KLOTZ (1969), wobei die Durchlässigkeit der eigenen Filterrohre trotz der Kiesbeklebung etwas größer ist. Die größte Durchlässigkeit weisen der Kiesstabfilter und der Scheibenfilter bei einer mittleren freien Durchtrittsfläche von ca. 15 % auf.

Die im Rahmen der Arbeit untersuchten Filterrohre sind bezüglich der möglichen freien Durchtrittsfläche im oberen Grenzbereich. Die Untersuchungen von KLOTZ (1969) oder auch SINGH & SHAKYA (1989) haben zur Optimierung der freien Durchtrittsfläche und letztendlich zur Entwicklung des Wickeldrahtfilters geführt. Dieses Filterrohr hat jedoch nach den eigenen Untersuchungen keine größere Durchlässigkeit als andere Filterrohrtypen (vgl. Abbildung 6.17), besitzt jedoch vor dem Hintergrund der Regenerierbarkeit von Brunnen einen Vorteil gegenüber kiesbeklebten Filterrohren (TRESKATIS et al., 1998). Da weitere Einflussfaktoren wie die Form der Filterrohröffnungen oder eine getrennte Betrachtung der Durchlässigkeit zusammengesetzter Filterrohre nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, werden für die weiteren Auswertungen drei verschiedene Klassen aus den eigenen Untersuchungen nach Abbildung 6.17 abgeleitet und dafür jeweils eine mittlere Filterrohrdurchlässigkeit berechnet (siehe Tabelle 6.9):

- Wickeldrahtfilter weisen eine große Durchtrittsfläche mit einer verhältnismäßig geringen Durchlässigkeit auf.
- Kiesbeklebte Schlitzbrückenfilter und Kieslochfilter haben eine mittlere Durchlässigkeit bei geringer Durchtrittsfläche.
- Kiesstabfilter und Scheibenfilter haben eine hohe Durchlässigkeit bei mittlerer Durchtrittsfläche.

Tabelle 6.9: Mittlere Durchlässigkeiten mit Standardabweichung für Filterrohrklassen

Filterrohrklasse	$k_{FR}$ [m/s]	$\sigma_{kFR}$ [m/s]
WDF	$4.88 \cdot 10^{-3}$	$6.03 \cdot 10^{-4}$
SBF und KLF	$6.96 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-3}$
KSF und SF	$9.31 \cdot 10^{-3}$	$1.34 \cdot 10^{-3}$

### 6.3.5 Schlussfolgerungen und Bewertung

Aus der vorangegangenen Bestimmung der Koeffizienten für die Einzelkomponenten des Brunnenfiltermodells ergeben sich die folgenden Erkenntnisse:

- Die kritische Reynoldszahl für den Übergang vom linear laminaren Regime zum nichtlinear laminaren Regime wird zu  $Re_{krit} = 1$  bestimmt.
- Die Widerstandsgesetze, welche aus der Durchströmung von Säulen abgeleitet werden, können auf die komplexe radiale Strömungssituation eines Brunnens übertragen werden und die Brunnenformel als analytisches Modell mit Verwendung eines Widerstandsgesetzes in Abhängigkeit vom Fließregime liefert belastbare Ergebnisse für die Koeffizienten der Einzelkomponenten.
- Als Porenraummodell für das Aquifermaterial und die Filterkiese eignet sich das Kapillarmodell mit der Erweiterung des Konzeptes des Hydraulischen Radius.
- Die ermittelten FORCHHEIMER-Koeffizienten sind vergleichbar mit Literaturwerten.
- Die zufällige Packungsstruktur poröser Materialien wird durch eine stochastische Behandlung der berechneten ERGUN-Koeffizienten berücksichtigt.
- Die Versuche mit Glaskugeln als Filterkies zeigen aufgrund der regelmäßigen Kornform eine deutlich geringere Streuung bei den berechneten ERGUN-Koeffizienten im Vergleich zu Sand- oder Kiesmaterial. Dieses Verhalten stimmt auch mit den Literaturwerten zu Glaskugeln überein.
- Für die weitere Auswertung werden statt deterministischer Werte die Schätzwerte der Verteilungsfunktionen für die ERGUN-Koeffizienten verwendet, um die sich zufällig einstellende Packungsstruktur der porösen Materialien zu berücksichtigen.
- Zur Ableitung universaler ERGUN-Koeffizienten sind weitere umfangreiche Versuche mit verschiedenen porösen Materialien notwendig, die jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.
- Die Filterrohrdurchlässigkeit ist nicht nur abhängig von der freien Durchtrittsfläche, sondern auch von der Öffnungsgeometrie, so dass eine Unterteilung in drei Klassen mit jeweils einer mittleren Filterrohrdurchlässigkeit für den nichtlinearen Regimebereich vorgenommen wird.

Die Frage der Ableitung universaler ERGUN-Koeffizienten für ungleichförmige poröse Medien wird in der Literatur kontrovers diskutiert und in aktuellen Veröffentlichungen werden Ansätze verfolgt, über die Tortuosität und weitere geometrische Parameter die Ermittlung allgemeiner Koeffizienten zu ermöglichen (OZAHİ et al.; 2008; WU et al., 2008). Grundsätzlich darf bei allen Ansätzen nicht außer Acht gelassen werden, dass diese Parameter der mikroskopischen Betrachtungsweise einer porösen Matrix schwer zu bestimmen und wenig hilfreich für eine makroskopische Betrachtung der Durchlässigkeit eines natürlichen porösen Materials sind. Für die Ermittlung des Druckverlustes von Festbettreaktoren in der chemischen Industrie mit gleichförmigen porösen Materialien wie z. B. Kugeln ist eine mikroskopische Betrachtungsweise durchaus zielführend und zeigt auch bei der Verwendung der ERGUN-Gleichung eine gute Prognosefähigkeit von  $\pm 10\%$  (NEMEC & LEVEC, 2005). Für Fragestellungen auf der Makroskala eines Aquifers muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine bezüglich der Kornform, Korngröße und Packungsstruktur heterogene poröse Matrix vorliegt und die Strömungsrandbedingungen nicht einheitlich sind. Daher ist eine probabilistische Vorgehensweise, wie sie im Ansatz im Rahmen dieser Arbeit verfolgt wird, geeigneter als die die Vielzahl der Versuche, einheitliche ERGUN-Koeffizienten für Kugeln oder andere poröse Materialien durch experimentelle Untersuchungen abzuleiten.

## 6.4 Zusammenführung zum Gesamtsystem mit Analyse der Trennflächen

Nach der Ermittlung der Koeffizienten für die Berechnung der Druckverluste der Einzelkomponenten aus den vorliegenden Messungen werden die Einzelkomponenten zu einem Brunnengesamtsystem zusammengefasst. Damit wird es möglich, den Verlauf der Druckhöhen als Funktion vom Radius für alle drei nacheinander durchströmten Einzelkomponenten eines Brunnens zu berechnen und eine Analyse der Trennflächen durchzuführen. Das Brechungsgesetz der Potentialtheorie nach Gleichung (3.34) ist für die vorliegende Untersuchung nicht anwendbar, da die Annahme eines linear laminaren Regimebereiches nach Kapitel 6.2 auf beiden Seiten der Trennflächen nicht zutrifft. Die folgenden Berechnungen werden mit den gemittelten Werten der Materialparameter vorgenommen.

### 6.4.1 Berechnung der Drucklinie für das Gesamtsystem

Mit den in Kapitel 6.3 ermittelten Koeffizienten wird die Drucklinie als Funktion vom Radius für das Gesamtsystem eines Brunnens im Grundwasserleiter, bestehend aus Aquifermaterial, Filterkies und Filterrohr, bestimmt. Abbildung 6.18 zeigt beispielhaft einen schematischen Gesamtdrucklinienverlauf mit der Bezeichnung der zugrunde liegenden Widerstandsgesetze für die Berechnung der Drucklinien der Einzelkomponenten.

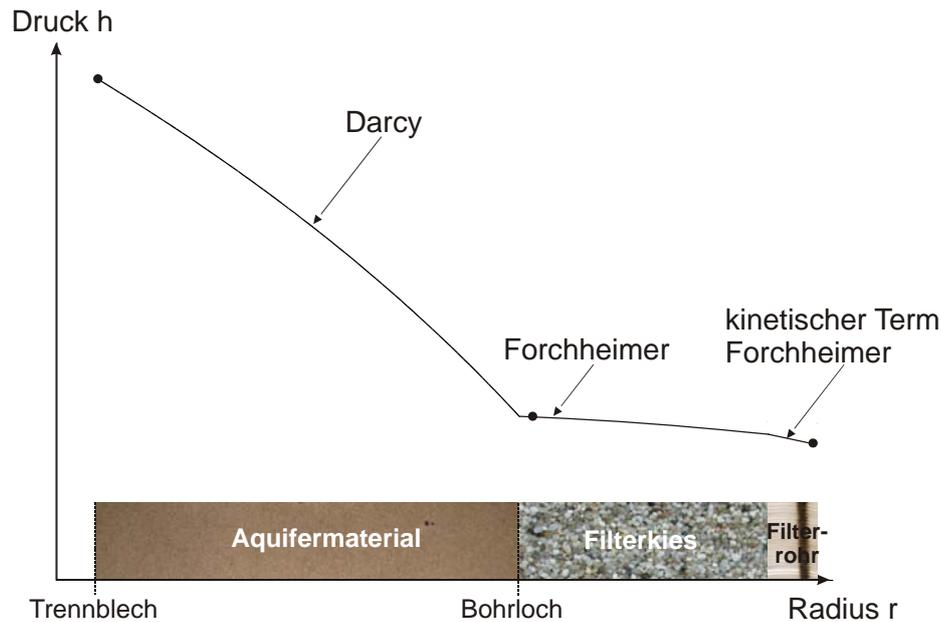


Abbildung 6.18: Definitionsskizze zur Berechnung der Drucklinie für das Gesamtsystem

Ausgehend von dem Druckmesspunkt direkt hinter dem abtrennenden Lochblech (vgl. Kapitel 4.2) wird für den gemessenen Durchfluss der Drucklinienverlauf im Aquifermaterial mit Gleichung (6.2) bis zum Bohrlochbeginn berechnet. Für den Filterkies wird analog ausgehend vom trennflächennahen Druckmesspunkt am Bohrlochrand die Drucklinie bis zum Filterrohr anhand Gleichung (6.6) bestimmt. Die Druckabnahme bei Durchströmung des Filterrohrs wird basierend auf dem Wasserstand im Filterrohr mit der in Kapitel 6.3.3 ermittelten Durchlässigkeit quantifiziert und damit der Drucklinienverlauf durch das Filterrohr berechnet.

Die Auswertung dieser Berechnungen für alle Versuchskonfigurationen zeigt die Abbildung 6.19 mit der Auftragung der berechneten Druckhöhen über den gemessenen Druckhöhen für das Aquifermaterial und den Filterkies. Grundlage für die Berechnungen sind jeweils die geschätzten Parameter bei Annahme einer Normalverteilung der vorhandenen Stichprobenwerte der ERGUN-Koeffizienten des Aquifermaterials und des Filterkieses. Die Punkte liegen zum Großteil dicht an der Winkelhalbierenden und zeigen somit eine gute Übereinstimmung, was das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression von 0,887 bestätigt. Auffällig ist jedoch die starke Abweichung bei kleinen Druckhöhen im Bereich bis 1000 mm. Diese werden hauptsächlich durch die trennflächennahen Druckmesspunkte im Aquifermaterial verursacht.

Aufgrund der zufälligen Packungsstruktur des eingebauten Aquifermaterials und der daraus resultierenden Streuung des ERGUN-Koeffizienten weichen die hierfür berechneten Drucklinien für einige Versuche deutlich von den gemessenen Werten ab. Durch den logarithmischen Verlauf der Drucklinie führt die Verteilungsfunktion des ERGUN-Koeffizienten somit bei kleiner werdendem Radius zu exponentiell wachsenden Abweichungen entlang der Drucklinie.

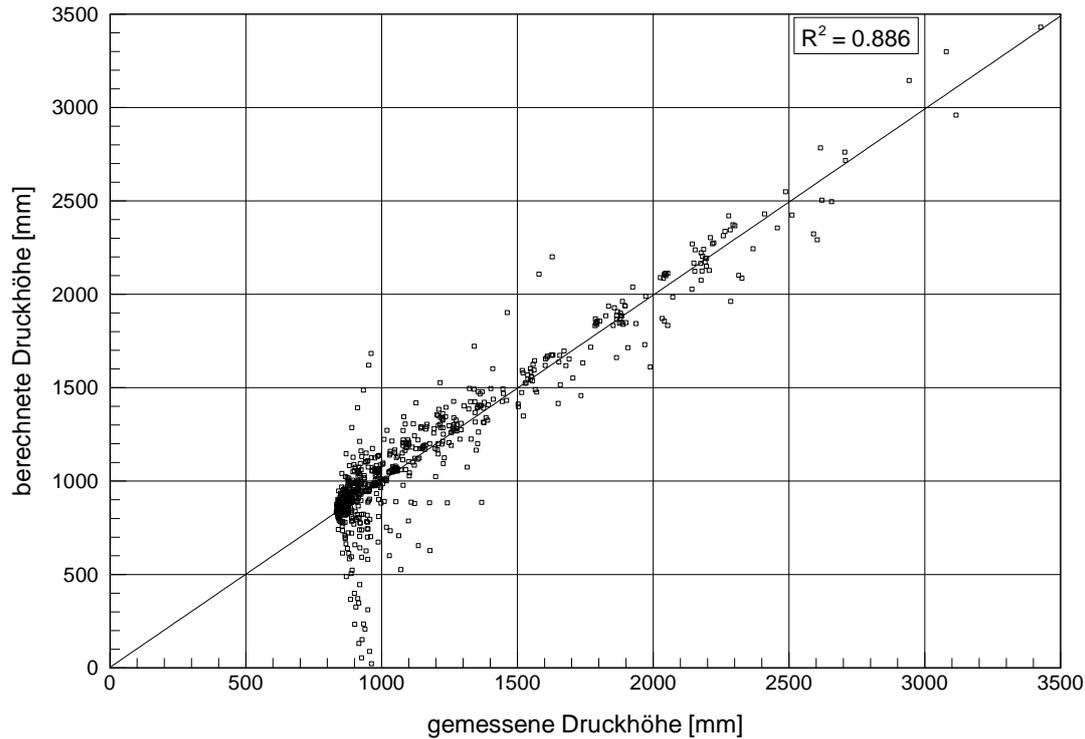


Abbildung 6.19: Berechnete Druckhöhen im Aquifermaterial und Filterkies verglichen mit gemessenen Druckhöhen für alle Versuchsconfigurationen

Beispielhaft ist daher in Abbildung 6.20 der berechnete Drucklinienverlauf mit Angabe der 90 %-Konfidenzgrenzen für eine Versuchsconfiguration dargestellt. Fast alle Messwerte liegen direkt auf der berechneten Drucklinie und zeigen damit eine sehr gute Übereinstimmung bei diesem Beispiel zwischen der Messung und den daraus abgeleiteten Koeffizienten. Die Parameterstreuung des Ergun-Koeffizienten im Aquifermaterial führt jedoch im angenommenen Vertrauensbereich zu einer maximalen Abweichung von über 220 mm am Bohrloch und zeigt dadurch den großen Einfluss der Parameterstreuung.

Anhand der Abbildung 6.20 wird deutlich, warum die Drucklinie des Gesamtsystems für eine Analyse der Trennflächen bestimmt werden muss. Das für diese Arbeit verwendete Konzept des Brunnenausschnittmodells beinhaltet die Durchströmung von drei Einzelkomponenten. Aufgrund der Reihenschaltung der drei Einzelkomponenten Aquifermaterial, Filterkies und Filterrohr entstehen zwei vertikale Trennflächen (siehe Abbildung 6.21), welche horizontal durchströmt werden. Für den Übergang am Bohrloch sind beim Beispiel in Abbildung 6.20 zwei trennflächennahe Druckmesspunkte vorhanden, allerdings liegen diese Druckmesspunkte immer noch 10 mm auseinander. Für die zweite Trennfläche zwischen Filterkies und Filterrohr sind keine trennflächennahen Druckmesspunkte vorhanden. Um festzustellen, ob an einer Trennfläche ein zusätzlicher Druckverlust durch Kolmationsprozesse oder Skineffekte auftritt, müssen die Druckwerte aus dem jeweiligen Material direkt am Radius der Trennfläche be-

stimmt werden. Aus diesen beiden Werten wird dann eine Trennflächendruckdifferenz berechnet (vgl. Kapitel 6.4.3). Zunächst wird jedoch untersucht, ob eine hydrodynamische Boden deformation auftreten kann.

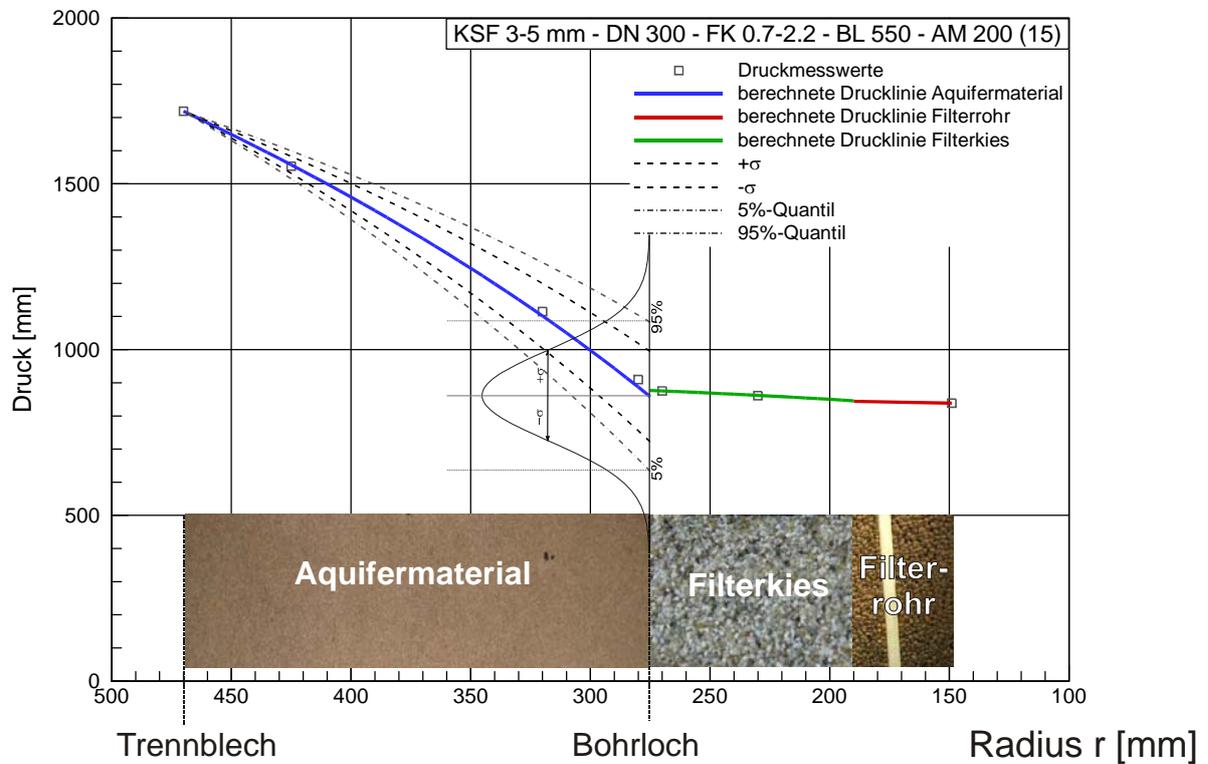


Abbildung 6.20: Berechneter Drucklinienverlauf als Funktion vom Radius für Beispielversuch



Abbildung 6.21: Beispielhafte Trennflächen zwischen Aquifermaterial und Filterkies (links) und Filterkies und Filterrohr (rechts) mit unterschiedlichem Maßstab

### 6.4.2 Überprüfung hydromechanischer Bodendeformationen

Die Trennfläche zwischen dem Aquifermaterial und dem Filterkies kann durch Erosions-, Kolmations- oder Suffosionsprozesse beeinflusst werden. Für die Untersuchung der hydromechanischen Bodendeformation wird daher anhand von geometrischen Filterregeln überprüft, ob Partikel durch die aufgetretene Strömungsgeschwindigkeit bewegt werden können. Dafür wird aus den von HUBER (2008) aufgeführten Filterkriterien das am meisten untersuchte und validierte Kriterium nach TERZAGHI & PECK (1961) ausgewählt. Deren Untersuchung zur Bemessung von mineralischen Filterkörnungen liefert ein geometrische Filterkriterium, wobei die Fraktilwerte der Korndurchmesser des Filtermaterials  $D$  und der Korndurchmesser des zu filternden Bodens  $d$  die folgenden Anforderungen einhalten sollen (TERZAGHI & PECK, 1961):

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \leq \frac{D_{15}}{d_{15}}. \quad (6.15)$$

Dieses Kriterium gilt jedoch nur für  $U < 2$ . Anhand der in Tabelle 6.10 aufgeführten Parameter wird ersichtlich, dass diese Forderung nur für den Filterkies 0.7-1.4 mm mit einem hohen Unterkornanteil (hU) und für den Filterkies 0.7-2.2 mm nicht erfüllt ist. Trotzdem werden zunächst alle Materialien mit dem Filterkriterium nach Gleichung (6.15) überprüft, da die Ungleichförmigkeit nur geringfügig größer ist. Die Fraktilwerte  $d_{15}$  und  $d_{85}$  des Aquifermaterials werden aus den Sieblinien aller Versuchskonfigurationen gemittelt.

Die mechanische Filterfestigkeit mit  $D_{15}/d_{85} \leq 4$  wird von den folgenden vier Filterkiesfraktionen für das vorliegende Aquifermaterial nicht eingehalten:

- Filterkies 1.0-2.0 mm
- Filterkies 1.4-2.2 mm
- Filterkies 2.0-3.15 mm
- Glaskugeln 1.25-1.65 mm

Bei diesen Materialien kann somit eine Kontakterosion nicht ausgeschlossen werden. Hierfür zeigen die durchgeführten Siebanalysen vor und nach jedem Versuch jedoch keinen Anhaltspunkt, da alle Sieblinien deckungsgleich bleiben (SCHÜTTRUMPF et al., 2009). Auch wurde keine verstärkte Sandführung beobachtet, so dass kein zusätzlicher Verlustanteil aufgrund von Erosionsprozessen zu berücksichtigen ist.

Die hydraulische Wirksamkeit mit  $D_{15}/d_{15} \geq 4$  ist bei den folgenden drei Materialien nicht gegeben:

- Filterkies 0.7-1.4 mm
- Filterkies 0.7-1.4 aL mm
- Filterkies 0.7-1.4 hU mm,

so dass sie als kolmationsgefährdet an der Kontaktfläche zu betrachten sind. Deshalb wird bei diesen Materialien in Kapitel 6.4.3 überprüft, ob ein zusätzlicher Verlustanteil an der Trennfläche berücksichtigt werden muss. Suffosionssicher sind Materialien für einen Ungleichförmigkeitsfaktor  $U < 8$  (BALKE et al., 2000; DVGW W 118, 2005; BUSCH et al, 1993). Dies trifft für alle verwendeten Materialien zu, somit ist keine innere Suffosion zu berücksichtigen.

Tabelle 6.10: Eingangswerte zur Berechnung des Filterkriteriums nach TERZAGHI & PECK (1961) für die einzelnen Filterkiese mit Angabe der Verhältnswerte  $D_{15}/d_{15}$  und  $D_{15}/d_{85}$  (grau hinterlegt sind die Werte, bei denen das Filterkriterium nicht eingehalten wird)

Material	$D_{15}$ [mm]	$d_{85}$ [mm]	$d_{15}$ [mm]	$U$ [-]	$D_{15}/d_{85}$	$D_{15}/d_{15}$
FK 0.7-1.4 mm	0.617	0.286	0.181	1.916	2.15	3.41
FK 0.7-1.4 mm DIN	0.824	0.286	0.181	1.653	2.88	4.56
FK 0.7-1.4 mm aL	0.691	0.286	0.181	1.893	2.41	3.82
FK 0.7-1.4 mm hU	0.339	0.286	0.181	2.568	1.18	1.88
FK 0.7-2.2 mm	0.966	0.286	0.181	2.074	3.37	5.35
FK 1.0-2.0 mm	1.204	0.286	0.181	1.521	4.21	6.66
FK 1.4-2.2 mm	1.407	0.286	0.181	1.429	4.91	7.78
FK 2.0-3.15 mm	2.084	0.286	0.181	1.389	7.28	11.53
GK 1.25-1.65 mm	1.307	0.286	0.181	1.148	4.56	7.23

### 6.4.3 Berechnung der Trennflächendruckdifferenzen

Für die weitere Untersuchung der Trennflächen werden für jede Versuchskonfiguration und jeden Durchfluss die Differenzen zwischen den für die Einzelkomponenten ermittelten Drucklinien an den Radien der Berührungspunkte mit den beiden folgenden Gleichungen (6.16) und (6.17) berechnet (siehe auch Abbildung 6.22).

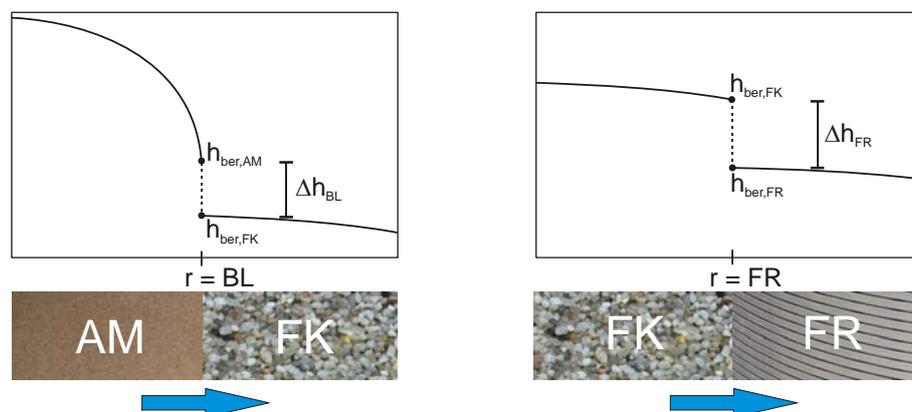


Abbildung 6.22: Definitionsskizze zur Berechnung der Druckdifferenzen für die Trennfläche am Bohrloch (links) und die Trennfläche am Filterrohr (rechts) bei einer Durchströmung von links nach rechts

$$\Delta h_{BL} = h_{ber,AM} \Big|_{r=BL} - h_{ber,FK} \Big|_{r=BL} \quad (6.16)$$

$$\Delta h_{FR} = h_{ber,FK} \Big|_{r=FR} - h_{ber,FR} \Big|_{r=FR} \quad (6.17)$$

Für die Trennfläche zwischen dem Aquifermaterial und dem Filterkies werden die jeweiligen Druckwerte der Einzelkomponenten am Bohrlochradius mit der Brunnenformel bestimmt und die Differenz aus diesen beiden Werten gebildet (siehe Gleichung (6.16)). Analog dazu wird für die zweite Trennfläche am Filterrohr der Druckwert im Filterkies anhand der Brunnenformel ermittelt und der Druckwert für das Filterrohr am Filterrohraußenradius mit dem quadratischen Term der FORCHHEIMER-Gleichung bestimmt. Eine Auswahl der so errechneten Trennflächendruckdifferenzen wird in Abhängigkeit von dem jeweiligen Durchfluss in der Abbildung 6.23 für die erste Trennfläche am Bohrloch und in der Abbildung 6.24 für die zweite Trennfläche am Filterrohraußenradius dargestellt.

Aus Kapitel 6.4.1 ist bekannt, dass gerade in Bohrlochnähe durch die Streuung des ERGUN-Koeffizienten für das Aquifermaterial große Abweichungen auftreten. Deswegen werden auch für die Trennflächendruckdifferenzen relativ große Streuungen ermittelt. Da diese Streuungen sich durch die angenommene Verteilungsfunktion für den linearen ERGUN-Koeffizienten des Aquifermaterials erklären lassen, werden nachfolgend in Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24 nur die Trennflächendruckdifferenzen der Versuchskonfigurationen mit FK 0.7-1.4 mm betrachtet. Hierfür ist nach Kapitel 6.4.2 eine mögliche Kolmation zu überprüfen. Die Darstellung aller Trennflächendruckdifferenzen findet sich im Anhang C.

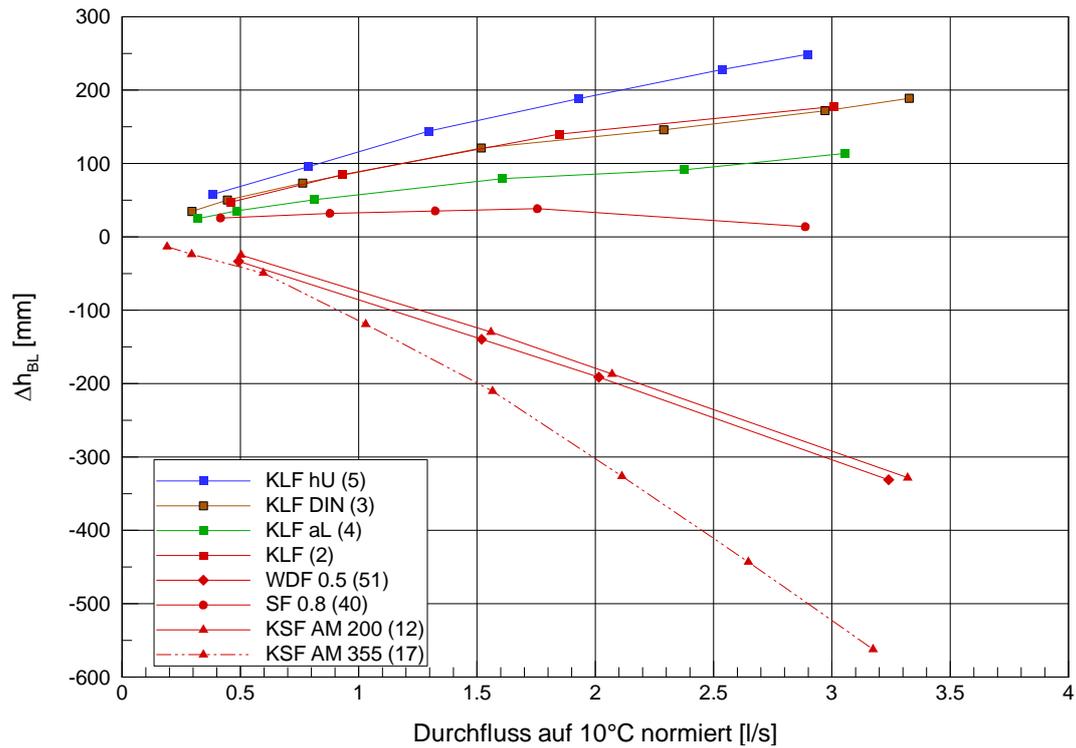


Abbildung 6.23: Trennflächendruckdifferenz am Bohrloch in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration mit FK 0.7-1.4 mm

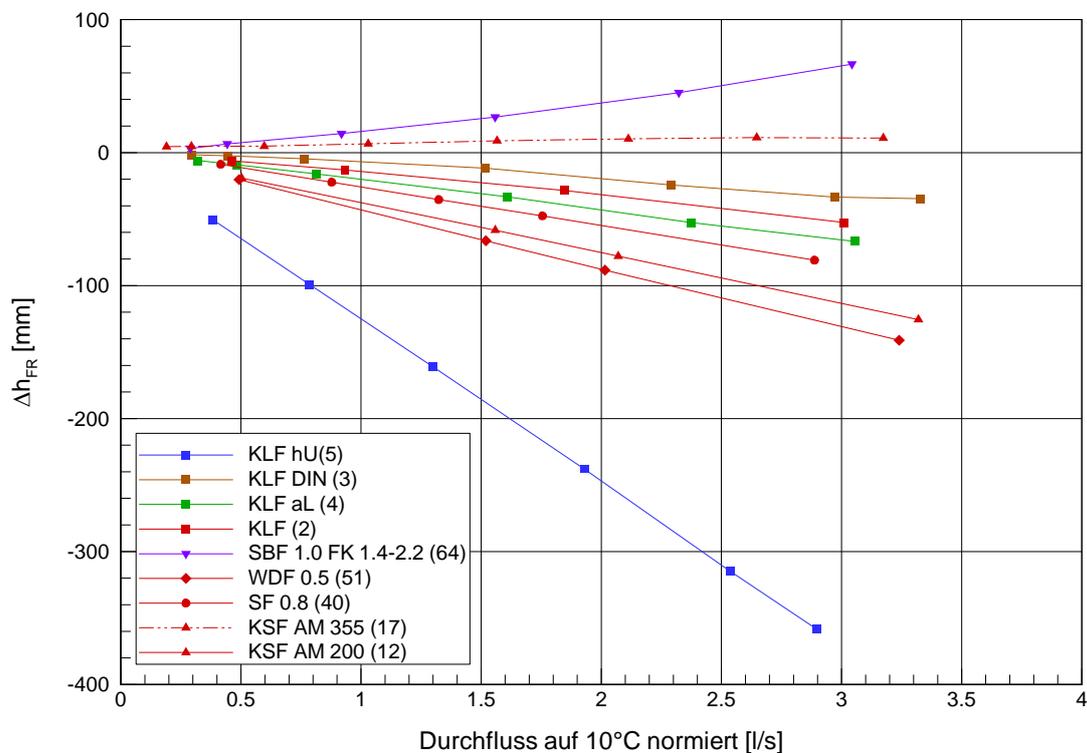


Abbildung 6.24: Trennflächendruckdifferenz am Filterrohr in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration mit FK 0.7-1.4 mm

Aus Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24 wird zunächst ersichtlich, dass die Druckdifferenz wie erwartet vom Durchfluss abhängt. Ein zunehmender Durchfluss führt zu anwachsenden Druckdifferenzen. Der Filterkies 0.7-1.4 mm führt sowohl zu negativen als auch zu positiven Druckdifferenzen an der Trennfläche zum Bohrloch. Würden nur positive Druckdifferenzen auftreten, so könnte dies ein Indiz für Kolmationsprozesse sein.

Der Vergleich der beiden Druckdifferenzen an den verschiedenen Trennflächen (Bohrloch und Filterrohr) für die Versuchskonfigurationen mit Kieslochfilter zeigt ein ähnliches Verhalten, da die Druckdifferenzen am Bohrloch jeweils stark positiv und am Filterrohr jeweils deutlich negativ sind. Daher wird für den auffälligsten Versuch mit dem hohen Unterkorngesamt (hU) die berechnete Gesamtdrucklinie beim größten gemessenen Durchfluss in Abbildung 6.25 betrachtet.

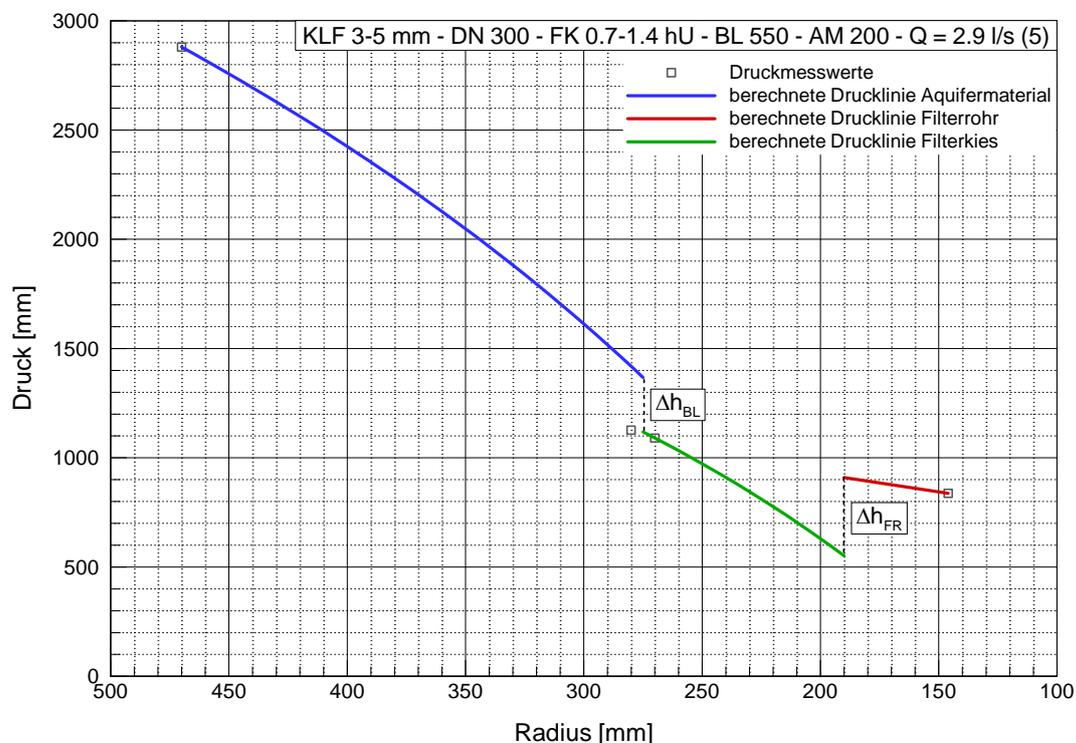


Abbildung 6.25: Berechneter Drucklinienverlauf für Versuchskonfiguration mit Kieslochfilter und FK 0.7-1.4 mm mit hohem Unterkorngesamt

Die berechnete Drucklinie im Aquifermaterial endet am Bohrloch zu hoch und die Neigung der berechneten Drucklinie im Filterkies ist zu steil, so dass die Drucklinie im Filterkies deutlich unter der Filterrohrdrucklinie endet. Die Neigung der berechneten Drucklinien hängt von der Durchlässigkeit der durchströmten Materialien ab, die anhand der Porosität, der Korngröße und der ERGUN-Koeffizienten berechnet wird. Den starken Einfluss der ERGUN-Koeffizienten auf die Drucklinie im Aquifermaterial zeigt schon Abbildung 6.20, des weiteren beeinflusst auch die Porosität den Verlauf der Drucklinie. Da die Messwerte in Abbildung

6.25 nicht alle gut durch die berechneten Drucklinien wiedergegeben werden, sind die großen Trennflächendruckdifferenzen auf die Unsicherheiten der Parameterermittlung zurückzuführen. Eine mögliche Kolmation im Filterkies ist aus den Versuchsergebnissen somit nicht ableitbar.

Die zweite Auffälligkeit in der Abbildung 6.24 ergibt sich bei der Betrachtung der Versuchskonfiguration mit stark anwachsender positiver Druckdifferenz. Ein zusätzlicher Druckverlust an der Trennfläche aufgrund von Inkrustationen am Filterrohr, wie dies auch von SCHNEIDER (2010) berichtet wird, ist der Grund für die Abweichungen. Als Filterrohr wird bei dieser Konfiguration der unbeklebte Schlitzbrückenfilter verwendet. Schon nach einer Woche Durchströmung im Versuchsstand zeigt dieses Filterrohr korrosive Verkrustungen, welche zum Verkleben des Filterkieses und Zusetzen der Filterschlitze führt (siehe Abbildung 6.26). Dadurch entsteht ein zusätzlicher Druckverlust, der die Druckdifferenzen an der Trennfläche vergrößert.



Abbildung 6.26: Ausgebauter Schlitzbrückenfilter ohne Kiesbeklebung nach einer Woche im Versuchsstand

Der Einbau der Versuchsmaterialien erfolgt unter Laborbedingungen manuell und ohne einen Bohrvorgang. Daher ist kein durch einen Bohrvorgang ausgelöster Skineffekt in der Versuchsauswertung zu berücksichtigen. Der jeweils eingebaute Brunnenausschnitt wird nicht durch einen Entsandungsprozess entwickelt. Da auch keine Erosions-, Suffosions- oder Kolmationsprozesse auftreten, ist ein Skineffekt (vgl. Kapitel 3.6.2) bei der vorliegenden Auswertung nicht zu betrachten. Entgegen den Erfahrungen aus der Praxis, dass immer ein Skin-

effekt auftritt, konnten somit durch die Versuchsrandbedingungen diese Prozesse ausgeschlossen werden. Trotzdem sind für eine Gesamtbetrachtung der Brunnenanströmung diese Prozesse nicht zu vernachlässigen.

Die Analyse der Trennflächen zeigt bis auf die Unsicherheiten der Parameterermittlung keine Auffälligkeiten. Die systembedingte Heterogenität der Packungsstruktur des Aquifermaterials und des Filterkieses führt zur Streuung der ERGUN-Koeffizienten. Für die Berechnung der Drucklinie im Aquifermaterial und Filterkies wird jedoch ein aus der Stichprobe geschätzter Wert für die ERGUN-Koeffizienten verwendet. Damit weichen die berechneten Drucklinienwerte im Aquifermaterial und Filterkies direkt am Bohrloch und direkt am Filterrohr für einige Versuchskonfigurationen stark ab. Diese Abweichungen aufgrund der gemittelten ERGUN-Koeffizienten haben den größten Einfluss auf die Trennflächendruckdifferenzen. Insgesamt zeigt das Ergebnis, dass eine Gesamtbeschreibung der Drucklinie anhand der berechneten Koeffizienten der Einzelkomponenten durchführbar ist und damit eine Analyse der Druckdifferenz an den Trennflächen vorgenommen werden kann.

## 6.5 Gesamtmodell der Brunnenanströmung bei gespannten Verhältnissen

Zusammenfassend lässt sich die Vorgehensweise zur Bestimmung der Brunnenanströmung im Nahbereich auf der Grundlage der experimentellen Ergebnisse und der theoretischen Analyse wie folgt darstellen: Das Strömungsregime in den Einzelkomponenten wird anhand der berechneten Reynoldszahlen innerhalb der festgelegten Grenzwerte nach Tabelle 2.5 ermittelt. Damit wird das benötigte Widerstandsgesetz zur Beschreibung der Strömungsbewegung und den daraus resultierenden Druckverlusten für die Einzelkomponenten festgelegt. Aus diesen Erkenntnissen wird ein analytisches Modell zur vollständigen Beschreibung der Brunnenanströmung im Nahbereich bei gespannten Verhältnissen unter Berücksichtigung aller Verlustkomponenten entwickelt, welches die folgende Form aufweist:

$$\Delta h_{\text{gesamt}} = \Delta h_{AM} + \Delta h_{FK} + \Delta h_{FR} + \Delta h_{\text{Skin}}. \quad (6.18)$$

Der Gesamtdruckverlust  $\Delta h_{\text{gesamt}}$  setzt sich zusammen aus dem Verlust beim Durchströmen der porösen Aquifermatrix  $\Delta h_{AM}$ , des Filterkieses  $\Delta h_{FK}$  und des Filterrohres  $\Delta h_{FR}$ . Des Weiteren werden die in der Praxis häufig auftretenden Verluste an den Trennflächen infolge von Suffosions- und Kolmationsprozessen oder einer Filterkuchenbildung durch einen Skineffekt  $\Delta h_{\text{Skin}}$  berücksichtigt. Mit diesem Gesamtwiderstandsgesetz wird der radiale Verlauf der Grundwasserdruckfläche zwischen einer Druckhöhe  $h(r_{AM})$  im umgebenden Aquifer und dem daraus resultierenden Wasserstand im Brunnen  $h(r_{Br})$  mit den Gleichungen nach Abbildung 6.27 beschrieben, wobei folgendermaßen vorzugehen ist:

1. Vorgabe der Brunnengeometrie und der Entnahmerate
2. Berechnung der Reynoldszahlen an den Trennflächen
3. Festlegung des Regimebereiches für jedes durchströmte Material anhand der ermittelten Reynoldszahlen
4. Einsetzen des festgelegten Widerstandsgesetzes in die Brunnenformel
5. Berechnung  $\Delta h_{AM}$ ,  $\Delta h_{FK}$  und  $\Delta h_{FR}$  anhand der Gleichungen in Abbildung 6.27 mit den Materialparametern wirksamer Korndurchmesser  $d_w$ , Porosität  $n$ , ERGUN-Koeffizienten  $A_E$  und  $B_E$  und Filterrohrdurchlässigkeit  $k_{FR}$
6. Berücksichtigung des Skineffektes infolge Filterkuchenbildung oder Suffosions- und Kolmationsprozesse mit Überprüfen von Filterregeln und Ansatz eines Verhältnisfaktors  $\alpha_{Skin} = k_{AM}/k_S$  für den Skineffektparameter.

Aus den eigenen Untersuchungen wird die kritische Reynoldszahl für den Übergang vom linear laminaren Regime zum nichtlinear laminaren Regime mit  $Re_{krit} = 1$  ermittelt. Für den Übergang zum turbulenten Regime können jedoch keine eigenen Aussagen getroffen werden, da dieser Bereich mit den Brunnenmodellversuchen nicht abgedeckt wird. Aus diesem Grund wird die kritische Reynoldszahl für den Übergang zum turbulenten Regime nach Literaturangaben mit  $Re_{krit} = 100$  festgelegt (vgl. Kapitel 2.4).

Bei Verwendung der Gleichungen muss der Durchfluss für die einzelnen Verlustkomponenten jeweils auf die tatsächlich durchströmte Fläche bezogen werden. Daher ist für das Aquifermaterial die Mächtigkeit  $m$  der grundwasserleitenden Schicht und für den Filterkies und das Filterrohr die verkiesten und verfilterten Längen ( $L_{FK}$  und  $L_{FR}$ ) des Brunnenausbaus anzusetzen.

Weiterhin wird für den Skineffekt im vorliegenden Gesamtmodell keine Unterscheidung hinsichtlich des Regimebereiches vorgenommen, da die Skinzone als infinitesimal dünn angenommen wird und somit der Skineffekt nur als zusätzlicher Druckverlust unabhängig von einer Durchströmungsmenge angesetzt wird.

Für das Filterrohr wird nach Kapitel 3.5.1 angenommen, dass das Filterrohr wie ein poröses Medium mit einem Durchlässigkeitsbeiwert zu betrachten ist und ein quadratischer Verlustanteil für das Filterrohr zu berücksichtigen ist.

$\Delta h_{\text{gesamt}} = \Delta h_{\text{AM}} + \Delta h_{\text{FK}} + \Delta h_{\text{FR}} + \Delta h_{\text{Skin}}$				
Regime	Aquifermaterial	Filterkies	Filterrohr	Skinneffekt
Re < 1 (linear laminar)	 $\Delta h_{\text{AM}} = A_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{Q}{2\pi m} \cdot \ln \left( \frac{r_{\text{AM}}}{r_{\text{BL}}} \right)$	 $\Delta h_{\text{FK}} = A_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{Q}{2\pi L_{\text{FK}}} \cdot \ln \left( \frac{r_{\text{BL}}}{r_{\text{FR}}} \right)$	 $\Delta h_{\text{FR}} = \frac{b_{\text{FR}}}{(2\pi \cdot r_{\text{Br}} \cdot k_{\text{FR}} \cdot L_{\text{FR}})^2} Q^2$	 $\Delta h_{\text{Skin}} = \frac{Q}{2\pi m} \cdot A_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot \alpha_{\text{Skin}} \cdot \frac{d_s}{r_{\text{BL}}}$
1 < Re < 100 (nichtlinear laminar)	$\Delta h_{\text{AM}} = A_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{Q}{2\pi m} \cdot \ln \left( \frac{r_{\text{AM}}}{r_{\text{BL}}} \right) + B_E \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_w} \cdot \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{r_{\text{BL}}} - \frac{1}{r_{\text{AM}}} \right)$	$\Delta h_{\text{FK}} = A_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{Q}{2\pi L_{\text{FK}}} \cdot \ln \left( \frac{r_{\text{BL}}}{r_{\text{FR}}} \right) + B_E \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_w} \cdot \left( \frac{Q}{2\pi L_{\text{FK}}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{r_{\text{FR}}} - \frac{1}{r_{\text{BL}}} \right)$		
Re > 100 (turbulent)	$\Delta h_{\text{AM}} = B_E \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_w} \cdot \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{r_{\text{BL}}} - \frac{1}{r_{\text{AM}}} \right)$	$\Delta h_{\text{FK}} = B_E \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_w} \cdot \left( \frac{Q}{2\pi L_{\text{FK}}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{r_{\text{FR}}} - \frac{1}{r_{\text{BL}}} \right)$		
Koeffizienten	$A_E = 217.80$ $\sigma_{A_E} = 34.48$	$A_E = 308.54$ $\sigma_{A_E} = 29.71$ $B_E = 3.01$ $\sigma_{B_E} = 1.69$	$A_E = 159.83$ $\sigma_{A_E} = 25.99$ $B_E = 1.28$ $\sigma_{B_E} = 0.42$	$k_{\text{FR,WDF}} = 4.88 \cdot 10^{-3}$ $k_{\text{FR,SBF u. KLF}} = 6.96 \cdot 10^{-3}$ $k_{\text{FR,KSF u. SF}} = 9.31 \cdot 10^{-3}$ $A_E = 217.80$ $\sigma_{A_E} = 34.48$

Abbildung 6.27: Gesamtmodell in Abhängigkeit vom Strömungsregime und vom durchströmten Material

Für das Aquifermaterial und den Filterkies werden regimeunabhängige ERGUN-Koeffizienten verwendet, obwohl nach FAND et al. (1987) eine Abhängigkeit dieser Koeffizienten von der Reynoldszahl besteht. Ausgehend von den von FAND et al. (1987) ermittelten und in Tabelle 2.4 angegebenen Werten wird dieser Einfluss im Vergleich zur Streuung der eigenen Versuchsergebnisse für das Aquifermaterial (vgl. Tabelle 6.3) als vernachlässigbar betrachtet. Da bisher keine umfangreichen experimentellen Untersuchungen mit natürlichen Sanden in allen drei Regimebereichen stattgefunden haben, wird diese Abhängigkeit für das vorliegende Modell nicht berücksichtigt.

Anstatt einer Verwendung fester ERGUN-Koeffizienten wird für die natürliche Parameterstreuung bei porösen Materialien eine probabilistische Betrachtungsweise vorgeschlagen und die aus den eigenen Untersuchungen geschätzten Verteilungsparameter nach Tabelle 6.8 als erster Anhaltswert hierfür verwendet. Wie der Vergleich mit den Literaturwerten in Kapitel 6.3.4 zeigt, streuen die ERGUN-Koeffizienten selbst für Kugeln in einem relativ großen Bereich. Die Ableitung fester Konstanten erscheint vor diesem Hintergrund nicht zielführend, da somit auch keine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die natürlichen Verhältnisse eines Grundwasserleiters gegeben ist. Mit dem aufgestellten Gesamtmodell nach Abbildung 6.27 sind alle Gleichungen vorhanden, um zum Beispiel eine Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung der Unsicherheit der Verlustkomponenten basierend auf der Unsicherheit der ERGUN-Koeffizienten durchzuführen. Dieser Ansatz wird in dem Anwendungsbeispiel im folgenden Kapitel weiter verfolgt.

Mit dem vorliegenden analytischen Modell ist das Ziel erreicht, die Anströmung eines Vertikalfilterbrunnens unter Berücksichtigung der verschiedenen durchströmten Materialien ohne empirische Verlustbeiwerte zu beschreiben und den Einfluss verschiedener Prozesse auf die Trennflächenwiderstände zu berücksichtigen.

## 7 Anwendungsbeispiel

### 7.1 Vorbemerkungen

Mit dem in Kapitel 6 neu aufgestellten Gesamtmodell ist eine Betrachtung der Brunnenanströmung im Nahbereich unter Berücksichtigung aller Verlustkomponenten möglich. Welchen Einfluss die verschiedenen Modellkomponenten auf den Druckverlust bei der Brunnenanströmung haben und in welchem Maß das Strömungsregime im Brunnennahbereich durch den Brunnenausbau beeinflusst werden kann, soll in diesem Kapitel ermittelt werden. Dafür wird mit dem Gesamtmodell aus Kapitel 6.5 die Gesamtdrucklinie eines Beispielbrunnens aus der Tagebauentwässerung für gespannte Verhältnisse im direkten Brunnennahbereich berechnet. Durch die Variation geeigneter Eingangsparameter wird der Einfluss dieser Parameter auf den Druckverlustanteil der Einzelkomponenten und auf den Gesamtdruckverlust quantifiziert. Anhand der Ergebnisse werden die folgenden Fragen beantwortet:

- Welche Auswirkung haben erhöhte Fließgeschwindigkeiten im Brunnennahbereich auf den Gesamtdruckverlust?
- Welchen Einfluss hat der Skineffekt auf den Gesamtdruckverlust?
- Welchen Einfluss hat die Porosität?
- Welchen Einfluss haben die Brunnenausbauaterialien und die Bohrlochgeometrie auf den Gesamtdruckverlust?

Da bei der Planung und Bemessung eines Brunnens neben der Brunnengeometrie nur die Brunnenausbauaterialien verändert werden können, wird abschließend bewertet, welche Optimierungsbandbreite hierbei erzielt werden kann.

Für die ERGUN-Koeffizienten der porösen Materialien werden in Kapitel 6.3 Verteilungsfunktionen ermittelt, die die Unsicherheiten der Parameterermittlung aufgrund der zufälligen Packungsstruktur poröser Medien berücksichtigen. Als probabilistische Methode zur Bestimmung der sich daraus ergebenden Unsicherheiten des analytischen Gesamtmodells werden die Berechnungen des Anwendungsbeispiels mittels der Monte-Carlo-Methode (erläutert beispielsweise in HUBER, 2008 und FORKEL, 2004) vorgenommen. Die Monte-Carlo-Methode wird verwendet, da sie modelltechnisch einfach umzusetzen und universal einsetzbar ist. Es werden 100000 zufällige Parameterkombinationen der mit Unsicherheiten behafteten ERGUN-Koeffizienten für Filterkies und Aquifermaterial gebildet und damit jeweils die Berechnung der Gesamtdrucklinie durchgeführt. Anschließend erfolgt eine statistische Auswertung der Ergebnisse mit Angabe des Mittelwertes und der Standardabweichung.

## 7.2 Brunnengeometrie

Als Anwendungsbeispiel wird ein unvollkommener Vertikalfilterbrunnen im Vorfeld der Tagebauentwässerung (siehe Abbildung 7.1) gewählt. Dieser Brunnen mit einem Bohrlochdurchmesser von 1200 mm verfügt über einen Ausbaudurchmesser von 500 mm und eine Verkiesung mit 1.4-2.2 mm bei einer Verkiesungslänge von 88 m. Der Ausbau der Brunnenbohrung erfolgt mit einem Kiesstabfilter mit 3-5 mm Kiesbeklebung. Die Bohrendteufe beträgt 322 m. Nur der tiefe Grundwasserleiter unter den Braunkohleflözen wird zur Druckentlastung verfiltert. Die gesamte Filterstrecke beträgt 60 m und ist aufgeteilt in vier Filterstrecken zu je 15 m. Der Grundwasserleiter ist im Ruhezustand gespannt. Für die Berechnungen wird ein idealisierter Grundwasserleiter angenommen, welcher unabhängig von der Entnahmerate im gespannten Zustand verbleibt. Außerdem werden stationäre Verhältnisse und eine mittlere Grundwassertemperatur von 15 °C angenommen. In der Tabelle 7.1 sind die Daten zur Brunnengeometrie und die vorgegebenen Ausbaumaterialien aufgelistet. Nach den Angaben von der RWE Power AG wird für diesen Brunnen eine effektive Porosität von 0.25 im Aquifermaterial und eine Entnahmerate von 2.5 m<sup>3</sup>/min erwartet.

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der Brunnenparameter

Parameter	Grundvariante
Bohrlochradius $r_{BL}$	600 mm
Filterrohrradius $r_{FR}$	295 mm
Filterrohrinnenradius $r_{Br}$	237.5 mm
Filterkies	FK 1.4-2.2 mm
Filterrohr	KSF 3-5 mm
Aquifermächtigkeit $m$	140 m
Verkiesungslänge $L_{FK}$	88 m
Filterrohrlänge $L_{FR}$	60 m
Porosität Filterkies	0.4
Verhältnissfaktor $\alpha_{Skin}$	100
Effektive Porosität Aquifermaterial	0.25
Entnahmerate $Q$	2.5 m <sup>3</sup> /min

Weiterhin wird angenommen, dass sich durch den Bohrvorgang ein Filterkuchen von 5 mm Dicke bildet (BARRASH et al., 2006), welcher eine um 2 Zehnerpotenzen geringere Durchlässigkeit als das Aquifermaterial aufweist (NOVAKOWSKI, 1989). Da für dieses Anwendungsbeispiel nur die Anströmung im Brunnennahbereich von Interesse ist, wird der äußere Radius des Betrachtungsbereichs auf 10 m festgelegt.

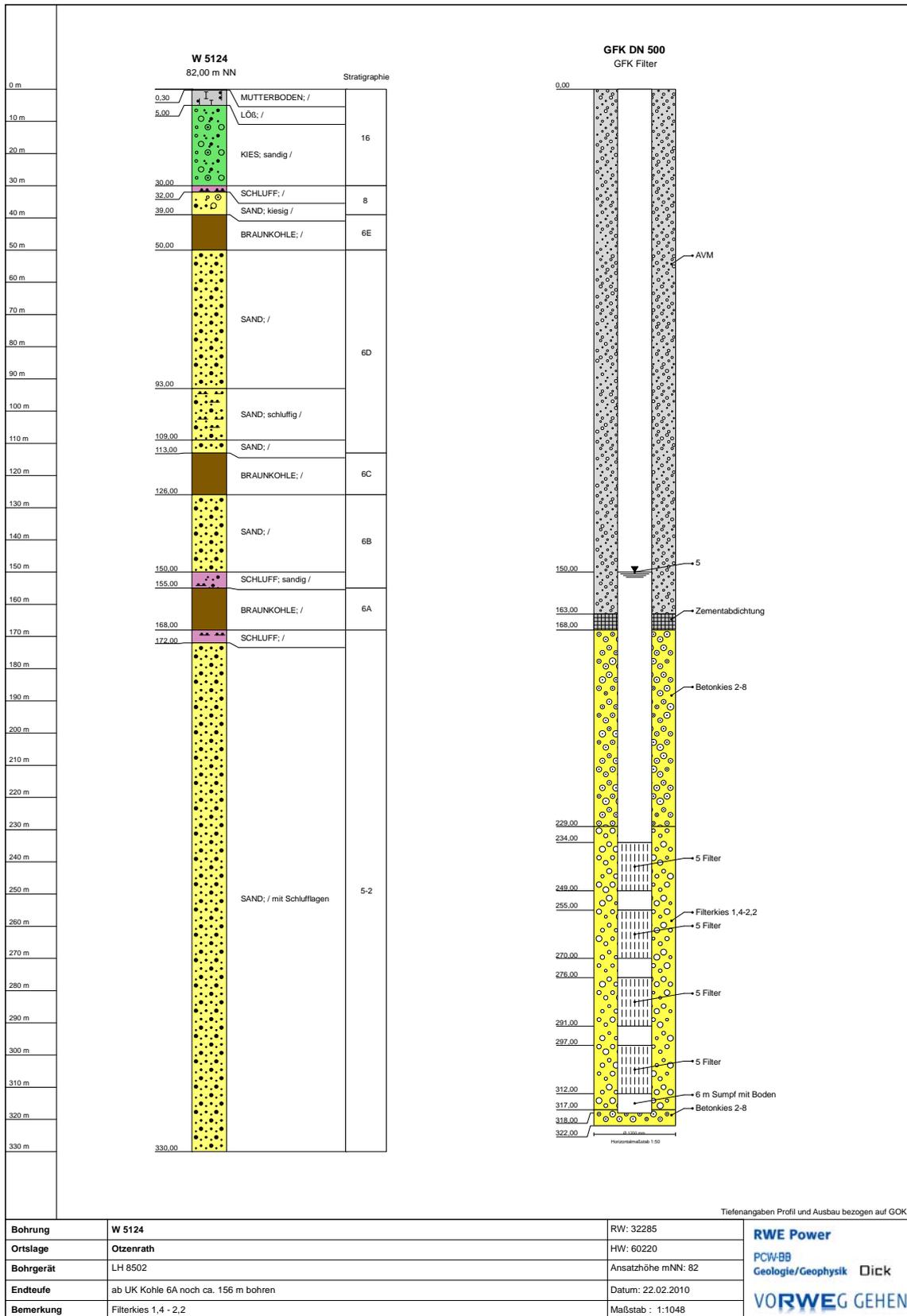


Abbildung 7.1: Bohr- und Brunnenprofil eines gespannten Entwässerungsbrunnens im Tagebaubereich Garzweiler (Quelle: RWE Power AG)

### 7.3 Anwendung des Gesamtmodells

Zunächst werden die Reynoldszahlen nach Gleichung (2.12) an den Trennflächen bestimmt, um das jeweils vorherrschende Strömungsregime festzulegen. Für das Aquifermaterial wird die Reynoldszahl am äußeren Radius des Betrachtungsbereiches und am Bohrlochrand ermittelt, während für den Filterkies die Reynoldszahl an den Trennflächen zum Aquifermaterial und zum Filterrohr berechnet wird. Die Ermittlung der Reynoldszahlen an den jeweils begrenzenden Radien dient der Überprüfung, ob es zu einem Wechsel des Strömungsregimes innerhalb eines durchströmten Materials kommt. Die berechneten Reynoldszahlen enthält Tabelle 7.2.

Tabelle 7.2: Auflistung der ermittelten Reynoldszahlen für die Einzelmaterialien an den begrenzenden Radien für eine Entnahmemenge von  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$

Material	$Re(r_{\text{außen}})$	$Re(r_{\text{innen}})$
Aquifermaterial	$9.2 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$
Filterkies 1.4-2.2 mm	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$3.7 \cdot 10^{-1}$
Filterrohr	1.0	1.2

Das Strömungsregime ist sowohl für den Filterkies als auch für das Aquifermaterial bei dieser Entnahmemenge im linear laminaren Bereich. Daher ist das Widerstandsgesetz nach DARCY anwendbar. Für das Filterrohr wird ein quadratischer Verlustanteil berücksichtigt, da das Strömungsregime im nichtlinear laminaren Bereich liegt. Werden die ermittelten Koeffizienten der Einzelkomponenten (vgl. Kapitel 6.3) für die vorliegende Brunnenberechnung verwendet, so ergeben sich die folgenden Mittelwerte aus der Monte-Carlo-Methode für die Durchflusswiderstände der Einzelkomponenten:

$$\Delta \bar{h}_{AM} = \bar{A}_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{\nu}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{Q}{2\pi m} \cdot \ln\left(\frac{r_{AM}}{r_{BL}}\right) = 2.47 \text{ [m]} \quad (7.1)$$

$$\Delta \bar{h}_{FK} = \bar{A}_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{\nu}{g \cdot d_w^2} \cdot \frac{Q}{2\pi L_{FK}} \cdot \ln\left(\frac{r_{BL}}{r_{FR}}\right) = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ [m]} \quad (7.2)$$

$$\Delta h_{FR} = \frac{b_{FR}}{(2\pi \cdot r_{Br} \cdot k_{FR} \cdot L_{FR})^2} Q^2 = 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ [m]} \quad (7.3)$$

$$\Delta \bar{h}_{Skin} = \frac{Q}{2\pi m} \cdot \bar{A}_E \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{\nu}{g \cdot d_w^2} \cdot \alpha_{Skin} \cdot \frac{d_s}{r_{BL}} = 0.73 \text{ [m]}. \quad (7.4)$$

Auf diese Weise ergibt sich ein mittlerer Gesamtdruckverlust von 3.2 m, welcher zum Großteil durch das durchströmte Aquifermaterial hervorgerufen wird.

Eine Bestätigung, dass die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit den geschätzten ERGUN-Koeffizienten einer Normalverteilung folgen, wird graphisch durch die Abbildung 7.2 erbracht. Dargestellt sind die empirischen Wahrscheinlichkeiten des Gesamtdruckverlustes, die sich aus der Monte-Carlo-Simulation bei 100000 durchgeführten Berechnungen ergeben. Da die Werte eine sehr gute Übereinstimmung mit der ebenfalls eingezeichneten Normalverteilung zeigen, werden für die weitere Auswertung jeweils nur die beiden Parameter der Normalverteilung, Mittelwert  $\bar{x}$  und Standardabweichung  $\sigma$ , angegeben.

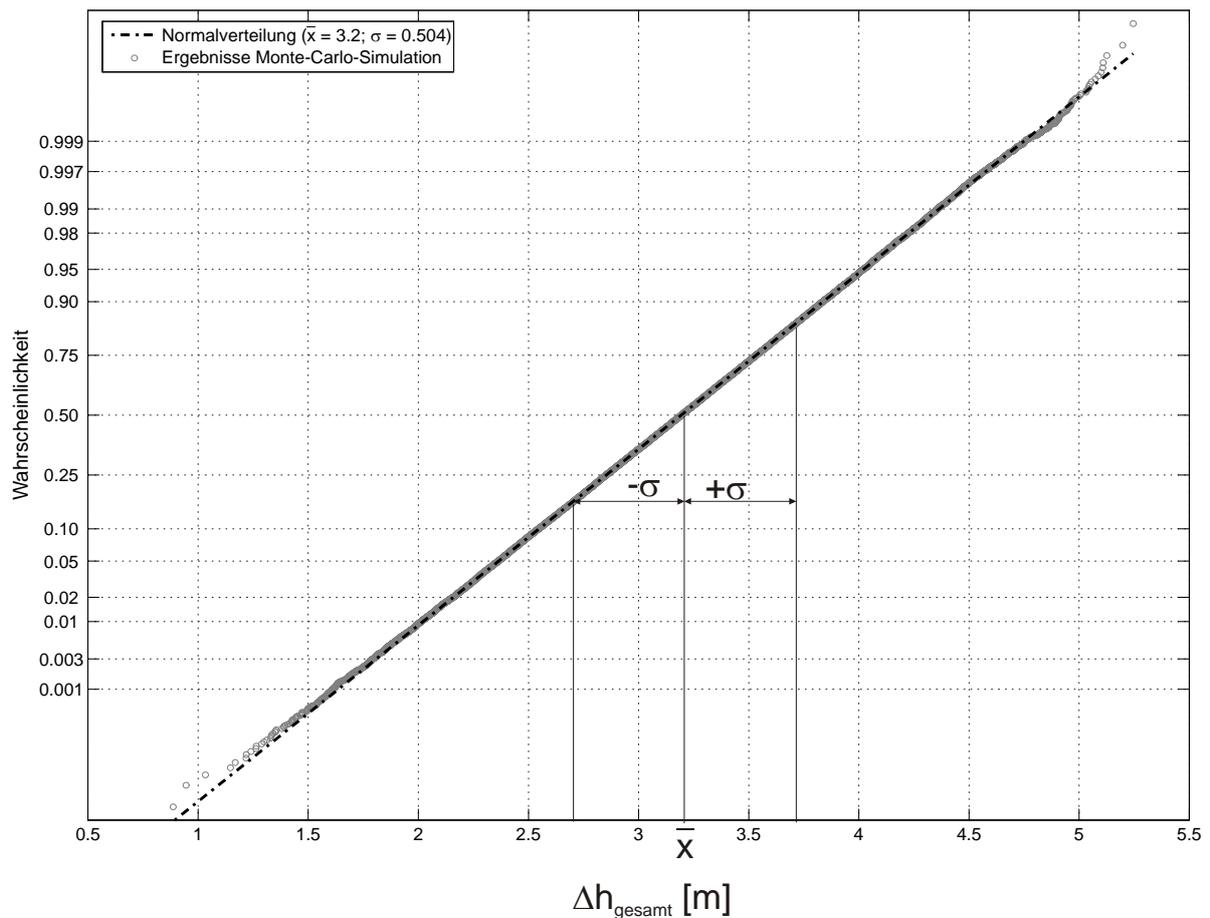


Abbildung 7.2: Wahrscheinlichkeiten der Ergebnisse bei 100000 durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen für den Gesamtdruckverlust

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf den Gesamtdruckverlust und auch auf Einzelverlustkomponenten zu ermitteln, wird die in Tabelle 7.3 dargestellte Variationsmatrix untersucht. Neben der Bohrlochgeometrie werden der Filterkies und das Filterrohr variiert. Außerdem werden unterschiedliche Durchflüsse und Porositäten untersucht. Der Einfluss des Skineffektes wird durch verschiedene Skinzonendurchlässigkeiten berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Variationsrechnungen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Tabelle 7.3: Variationsmatrix zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter auf den Gesamtdruckverlust anhand des Gesamtmodells

Bohrlochgeometrie	FK	FR	Q	n	$\alpha_{Skin}$
BL 550 / DN 300	0.7-1.4 mm	KSF 3-5 mm	1.25 m <sup>3</sup> /min	0.30	10
BL 860 / DN 400	2.0-3.15 mm	WDF 0.5 mm	5.0 m <sup>3</sup> /min	0.35	1000
BL 1500 / DN 750	Glaskugeln	SF 1.0 mm	7.5 m <sup>3</sup> /min	0.40	10000

### 7.3.1 Variation der Bohrlochgeometrie

Als erster Parameter wird die Bohrlochgeometrie für den vorliegenden Brunnen variiert. Neben zwei kleineren Bohrlöcherdurchmessern (BL 550 / DN 300 und BL 860 / DN 400) mit den zugehörigen nominalen Filterrohrdurchmessern wird ein größerer Bohrlöcherdurchmesser (BL 1500 / DN 750) untersucht. Die Ergebnisse werden in Abbildung 7.3 als Prozentanteil der mittleren Einzelverluste am Gesamtdruckverlust für die drei Varianten im Vergleich zur Grundvariante (BL 1200 / DN 500) dargestellt.

Auffällig sind die großen Verlustanteile des Aquifermaterials  $\Delta h_{AM}$  und des Skineffektes  $\Delta h_{Skin}$ , die bei allen vier Bohrlochgeometrien zusammen mehr als 99 % des Gesamtdruckverlustes ausmachen. Im Verhältnis dazu sind die Verlustanteile des Brunnenausbaus  $\Delta h_{FK}$  und  $\Delta h_{FR}$  sehr klein. Somit kann durch die Variation der Brunnenausbaumaterialien Filterkies und Filterrohr der Gesamtdruckverlust nur in sehr geringem Maß beeinflusst werden. Das Verhältnis zwischen den beiden Verlustanteilen des Skineffektes und des Aquifermaterials ändert sich mit der Bohrlochgeometrie, da der Skineffektanteil mit kleiner werdendem Bohrloch zunimmt. Daher wird nachfolgend der Verlauf der Gesamtdrucklinie betrachtet, um den Grund hierfür zu ermitteln.

In Abbildung 7.4 sind die berechneten Gesamtdrucklinien für die vier Bohrlochgeometrien in Abhängigkeit vom Radius dargestellt. Der Verlustanteil, der aus der Durchströmung des Aquifermaterials resultiert, ist zunächst für abnehmende Radien für alle vier Varianten identisch. Beim Erreichen des jeweiligen Bohrloches tritt dann der Einfluss des Skineffektes auf, welcher einen zusätzlichen Druckverlust am Bohrlochrand erzeugt. Je nach Bohrlochgeometrie ändert sich somit bezogen auf den Gesamtdruckverlust der Einzelverlustanteil und führt damit zu dem oben beschriebenen Effekt. Die Druckverlustanteile des Brunnenausbaus mit Filterkies und Filterrohr führen im Verhältnis zum Aquifer- und Skineffektverlustanteil zu sehr geringen Druckverlusten. Für jede Drucklinie ist der erreichte Gesamtbetrag des Druckverlustes nach der Durchströmung von Aquifermaterial, Skinzone, Filterkies und Filterrohr in Abbildung 7.4 angegeben.

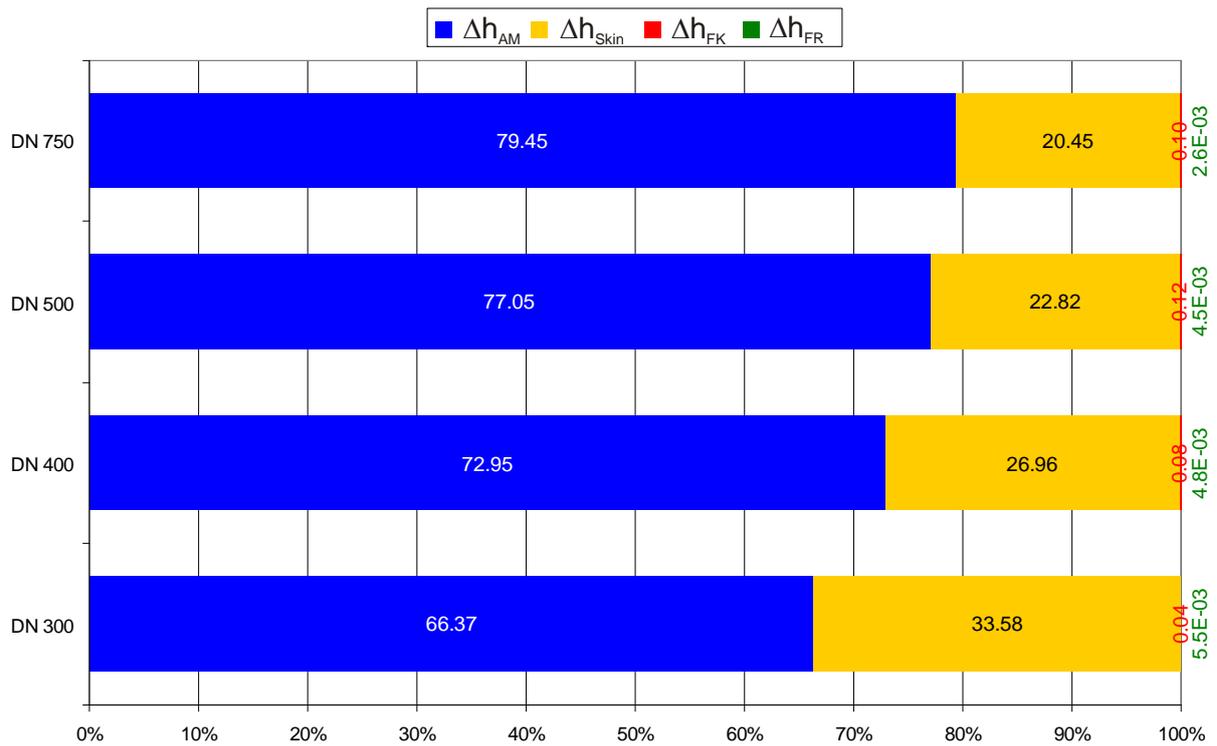


Abbildung 7.3: Prozentuale Anteile der Einzeldruckverluste am Gesamtdruckverlust für verschiedene Bohrlochgeometrien bei einer Entnahmemenge von  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$

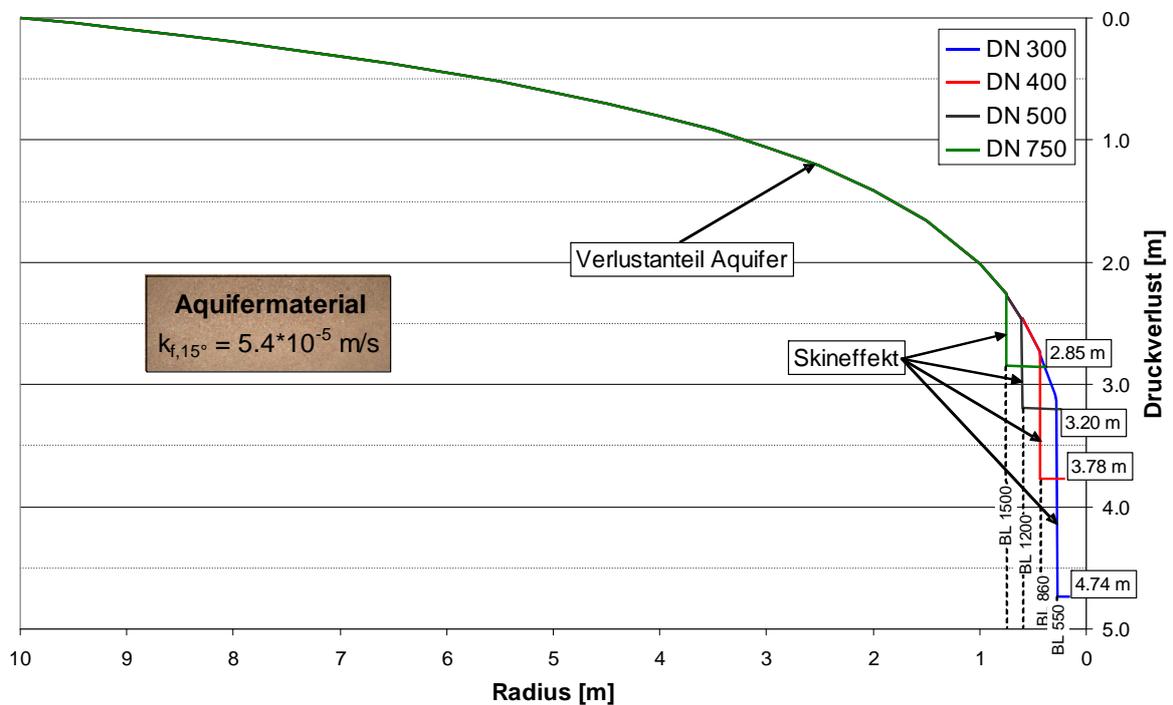


Abbildung 7.4: Darstellung der Gesamtdrucklinie für verschiedene Bohrlochgeometrien bei einer Entnahmemenge von  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$

### 7.3.2 Variation der Brunnenausbaumaterialien

Zunächst werden die drei verschiedenen Verkiesungsvarianten im Vergleich zur Grundvariante (FK 1.4-2.2 mm) untersucht, um den Einfluss der Verkiesungsart auf den Filterkiesdruckverlustanteil  $\Delta h_{FK}$  zu bestimmen. Die Ergebnisse der Filterkiesvariation für die vier verschiedenen Bohrlochgeometrien enthält Abbildung 7.5. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert sowie die Standardabweichung als Fehlerbalken, die sich aus der Monte-Carlo-Simulation ergeben. Für die Filterkiese und Glaskugeln werden die geschätzten ERGUN-Koeffizienten aus Tabelle 6.8 verwendet und somit nur der wirksame Korndurchmesser entsprechend der Kornverteilung geändert. Die Reynoldszahlen im Filterkies sind bei der Entnahmemenge von 2.5 m<sup>3</sup>/min im linear laminaren Bereich.

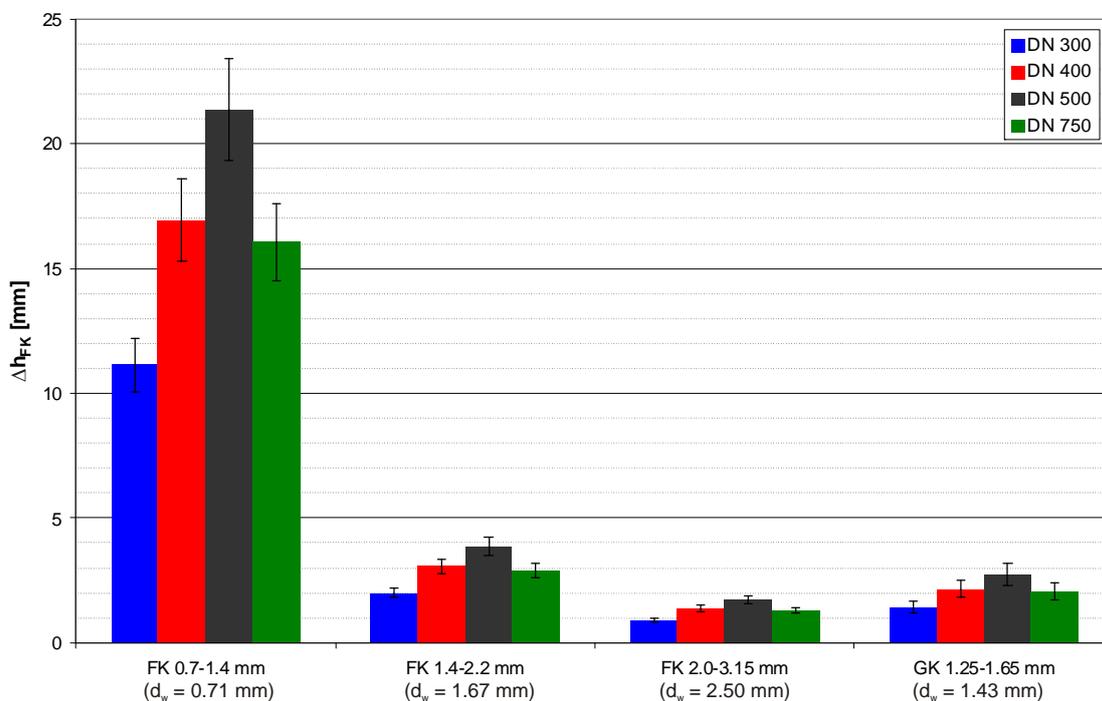


Abbildung 7.5: Vergleich der Druckverlustanteile für verschiedene Filterkiese bei  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$  und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien

Im Vergleich zeigt die feine Verkiesung mit FK 0.7-1.4 mm einen deutlich erhöhten Druckverlustanteil gegenüber den drei anderen Verkiesungen. Die Verkiesung mit 2.0-3.15 mm führt rechnerisch zu den geringsten Druckverlusten, da dieser Filterkies im Verhältnis zu den anderen Verkiesungen den größten wirksamen Korndurchmesser aufweist. Die Unsicherheit aus den variablen ERGUN-Koeffizienten ist beim Filterkies kleiner als 10 % und beträgt bei den Glaskugeln 16 % aufgrund des im Vergleich kleineren Mittelwertes für den linearen ERGUN-Koeffizienten.

Die Abbildung verdeutlicht den Einfluss des wirksamen Korndurchmessers  $d_w$  auf den Druckverlust, da bei den Filterkiesen der Unterschied im Druckverlust nur durch die ver-

schiedenen Korndurchmesser hervorgerufen wird. Wie bei den durchgeführten Brunnenmodellversuchen (vgl. Kapitel 5.3.3) führt daher auch bei diesem Anwendungsbeispiel die Standardverkiesung mit  $d_w = 0.71$  mm zu einem signifikant erhöhtem Druckverlust im Vergleich zum FK 1.4-2.2 mm mit  $d_w = 1.67$  mm. Der Unterschied im Druckverlustanteil zwischen dem FK 1.4-2.2 mm und dem noch gröberen FK 2.0-3.15 mm ist dagegen auch wie bei den Brunnenmodellversuchen nur geringfügig, obwohl sich der wirksame Korndurchmesser um den Faktor 1.5 erhöht. Die Glaskugeln weisen zwar einen geringeren wirksamen Korndurchmesser als der FK 1.4-2.2 mm auf, haben allerdings auch kleinere ERGUN-Koeffizienten, so dass sich wie bei den Brunnenmodellversuchen auch hier beinahe identische Druckverluste einstellen.

Weiterhin auffallend ist, dass die Grundvariante (BL 1200 / DN 500) bei allen vier Verkiesungen die größten Druckverluste hervorruft. Dies ist auf die Dicke und Geometrie der Verkiesungsschicht zurückzuführen, welche in Tabelle 7.4 für die einzelnen Bohrlochvarianten aufgelistet ist. Da der Logarithmus der Brunnenradien in die Berechnungen eingeht, ist die Grundvariante geometrisch die ungünstigste und führt daher zu den jeweils größten Druckverlusten auf der Verkiesungsstrecke. Gegenüber dem Gesamtdruckverlust sind die Druckverluste der Verkiesung als geringfügig zu bewerten, da sie weniger als 25 mm betragen.

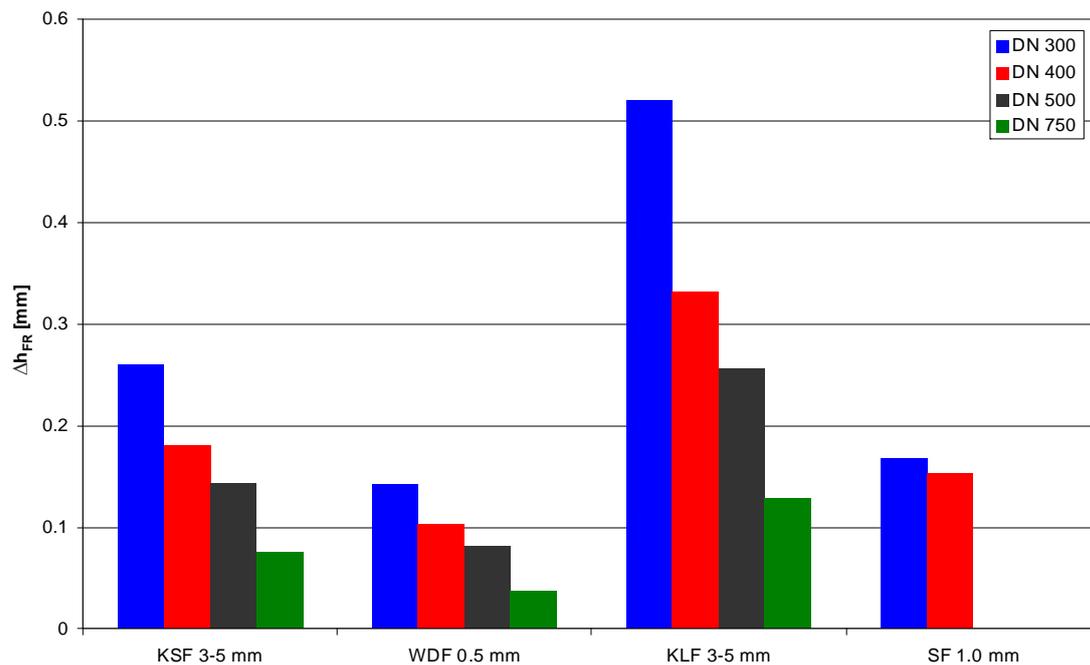
Tabelle 7.4: Brunnenausbauradien für verschiedene Geometrien mit Angabe der Verkiesungsdicke

BL [mm]	DN [mm]	$r_{BL}$ [mm]	$r_{FR}$ [mm]	Verkiesungsdicke [mm]	$\ln(r_{BL}/r_{FR})$
550	300	275	190	85	0.37
860	400	430	245	185	0.56
1200	500	600	295	305	0.71
1500	750	750	440	310	0.53

Als Filterrohrvariation werden neben dem Kiesstabfilter ein Kieslochfilter sowie ein Wickeldrahtfilter und ein Scheibenfilter für die Berechnung des Filterrohrdruckverlustes verwendet. Die damit ermittelten Druckverlustanteile enthält Abbildung 7.6. Da sich der Scheibenfilter noch in der Entwicklung befindet und aus Festigkeitsgründen voraussichtlich nicht in großen Bohrlöchern zum Einsatz kommen wird, werden nur die bereits vorhandenen Varianten DN 300 und DN 400 für dieses Filterrohr berücksichtigt. Die Filterrohrgeometrien für die Berechnung der Druckverlustanteile sind in Tabelle 7.5 zusammengefasst.

Tabelle 7.5: Filterrohrgometrie für verschiedene Bohrlochdurchmesser (alle Angaben in mm)

BL	DN	KSF 3-5 mm		WDF 0.5 mm		KLF 3-5 mm		SF 1.0 mm	
		r <sub>Br</sub>	b <sub>FR</sub>	r <sub>Br</sub>	b <sub>FR</sub>	r <sub>Br</sub>	b <sub>FR</sub>	r <sub>Br</sub>	b <sub>FR</sub>
550	300	149	41	147	6	146	44	145	25
860	400	196	49	200	8	195	50	192	40
1200	500	237.5	57.5	250.5	10	237.5	57.5	-	-
1500	750	367.5	72.5	372	10	370	70	-	-

Abbildung 7.6: Vergleich der Druckverlustanteile für verschiedene Filterrohre bei  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$  und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien

Der Kieslochfilter führt zu den höchsten Druckverlusten im Vergleich zu den drei anderen Filterrohren, während der Wickeldrahtfilter aufgrund seiner geringen Wandstärke die kleinsten Verluste hervorruft. Durch die Berücksichtigung des inneren Brunnenradius bei der Ermittlung des Druckverlustes führt ein größeres Bohrloch bei allen Filterrohren zu geringeren Druckverlusten. Insgesamt betrachtet sind jedoch die Druckverluste aufgrund der Filterrohrdurchströmung gegenüber dem Gesamtdruckverlust zu vernachlässigen, da sie alle kleiner als 1 mm sind.

### 7.3.3 Variation der Porosität

Da der Filterkies erst beim Brunnenausbau in den Ringraum geschüttet wird, ist die Porosität dieses Materials nicht vorgegeben, sondern stellt sich durch den Schüttungsprozess ein. Das

Aquifermaterial weist aufgrund seiner Entstehungsgeschichte eine vorgegebene Lagerungsdichte und eine daraus resultierende Porosität auf, welche im Aquifer nicht veränderlich ist. Nur durch einen Entsandungsprozess nach Brunnenfertigstellung können Feinstbestandteile aus dem Brunnennahbereich ausgespült werden und die Porosität dort erhöhen. Deshalb wird als weitere Variation der Einfluss der Porosität anhand von drei verschiedenen Abstufungen im Vergleich zur Porosität der Grundvariante ( $n = 0.25$ ) ermittelt:

- $n = 0.3$
- $n = 0.35$
- $n = 0.4$

Da ein Entsandungsprozess nur direkt am Bohrloch wirkt, wird nach DVGW (2003) eine erhöhte Porosität im Aquifermaterial für eine Dicke von 10 cm angesetzt.

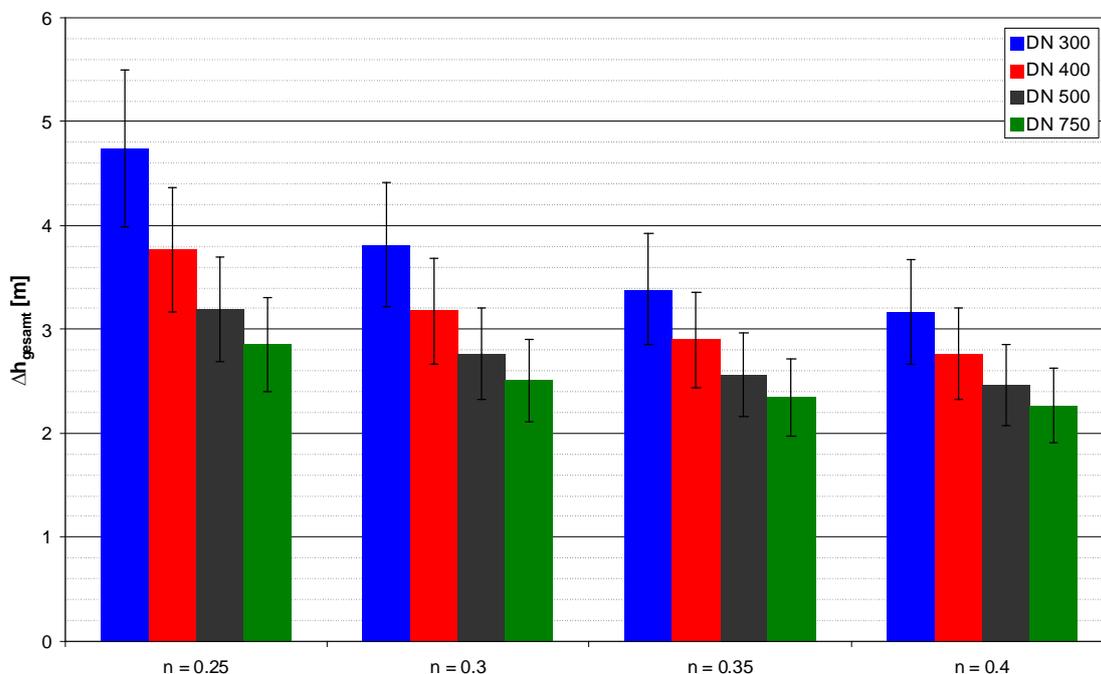


Abbildung 7.7: Vergleich der Gesamtdruckverluste für verschiedene Porositäten bei  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$  und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien

Die Abbildung 7.7 zeigt die berechneten Gesamtdruckverluste für die vier verschiedenen Porositäten. Wie zu erwarten, reduziert sich der Gesamtdruckverlust mit zunehmender Porosität und zunehmender Bohrlochgröße. Im Vergleich kann der Gesamtdruckverlust von 4.74 m auf 2.27 m halbiert werden, wenn ein erfolgreicher Entsandungsprozess eine effektive Porosität von 0,4 am Bohrloch erzeugt und statt des kleinsten Bohrlochdurchmessers von DN 300 ein DN 750 gewählt wird. Aus der Monte-Carlo-Simulation wird eine Unsicherheit für den Gesamtdruckverlust von 16 % für alle Varianten ermittelt.

### 7.3.4 Variation der Entnahmemenge

Um den Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf den Gesamtdruckverlust zu ermitteln, wird die geplante Entnahmemenge in drei Abstufungen variiert: zunächst halbiert, dann verdoppelt und schließlich verdreifacht. Das Resultat dieser Variation im Vergleich zur Grundvariante mit  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$  ist für den Gesamtdruckverlust in Abbildung 7.8 dargestellt.

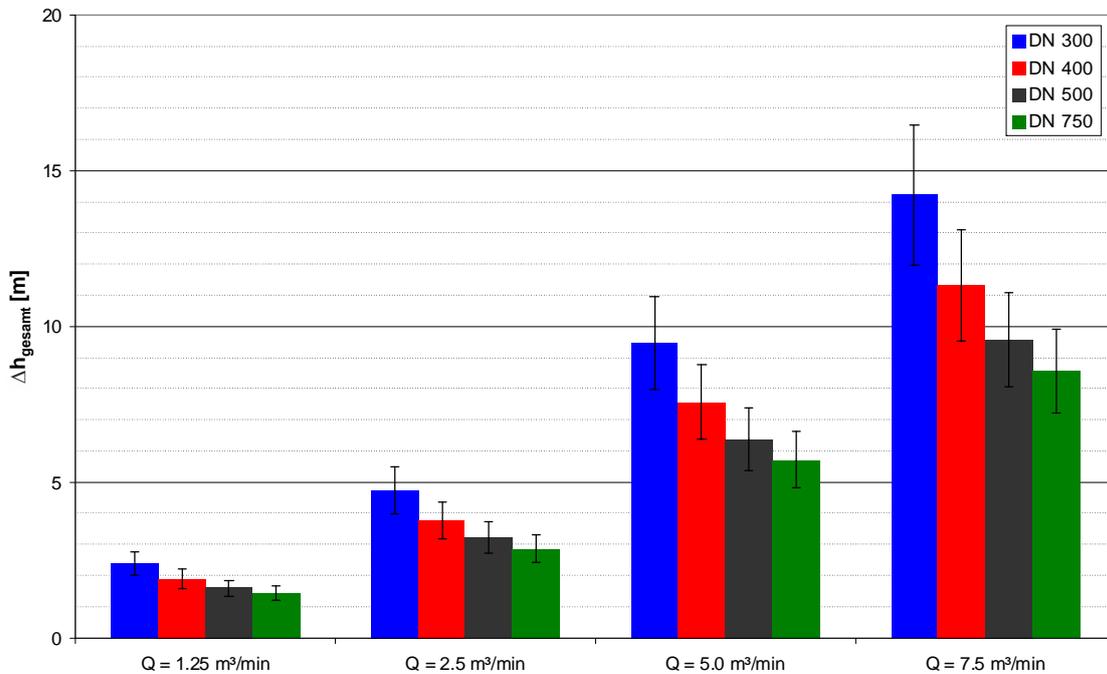


Abbildung 7.8: Vergleich der Gesamtdruckverluste für verschiedene Entnahmemengen  $Q$  bei vier verschiedenen Bohrlochgeometrien

Der Gesamtdruckverlust wächst mit zunehmendem Durchfluss an, wobei auch hier der kleinste Bohrlochdurchmesser die größten Druckverluste verursacht. Der höchste Druckverlustanteil wird durch das Aquifermaterial hervorgerufen, welches bei der kleinsten Bohrlochgeometrie die größte radiale Ausdehnung aufweist und somit zu den jeweils stärksten Gesamtdruckverlusten führt. Aufgrund der unsicheren Eingangsparameter wird mit der Monte-Carlo-Methode eine Unsicherheit von 16 % für den Gesamtdruckverlust berechnet.

Eine Überprüfung der Reynoldszahlen (siehe Anhang Abbildung D.1) zeigt, dass die Strömung im Aquifermaterial auch bei der erhöhten Entnahmemenge im linear laminaren Regime bleibt. Für die Filterkiesstrecke treten bei der größten Entnahmemenge Reynoldszahlen größer 1 direkt am Filterrohr auf. Daher wird hierfür eine getrennte Berechnung der Druckverlustanteile des Filterkieses durchgeführt.

### 7.3.5 Variation der Skinzonendurchlässigkeit

Zur Variation der Skinzonendurchlässigkeit wird der Verhältnissfaktor  $\alpha_{Skin}$  in drei Abstufungen verändert. Dieser Faktor gibt an, in welchem Verhältnis sich die Skinzonendurchlässigkeit von der Aquifermaterialdurchlässigkeit unterscheidet. Je größer der Faktor, desto undurchlässiger ist die Skinzone. Für die Grundvariante wird eine um zwei Zehnerpotenzen geringere Durchlässigkeit angenommen, dieser Wert wird in drei Abstufungen nach Tabelle 7.3 variiert (vgl. NOVAKOWSKI, 1989). Die Skinzonendicke wird dabei nicht verändert. Die Auswirkungen dieser Variation auf den Druckverlustanteil der Skinzone zeigt Abbildung 7.9

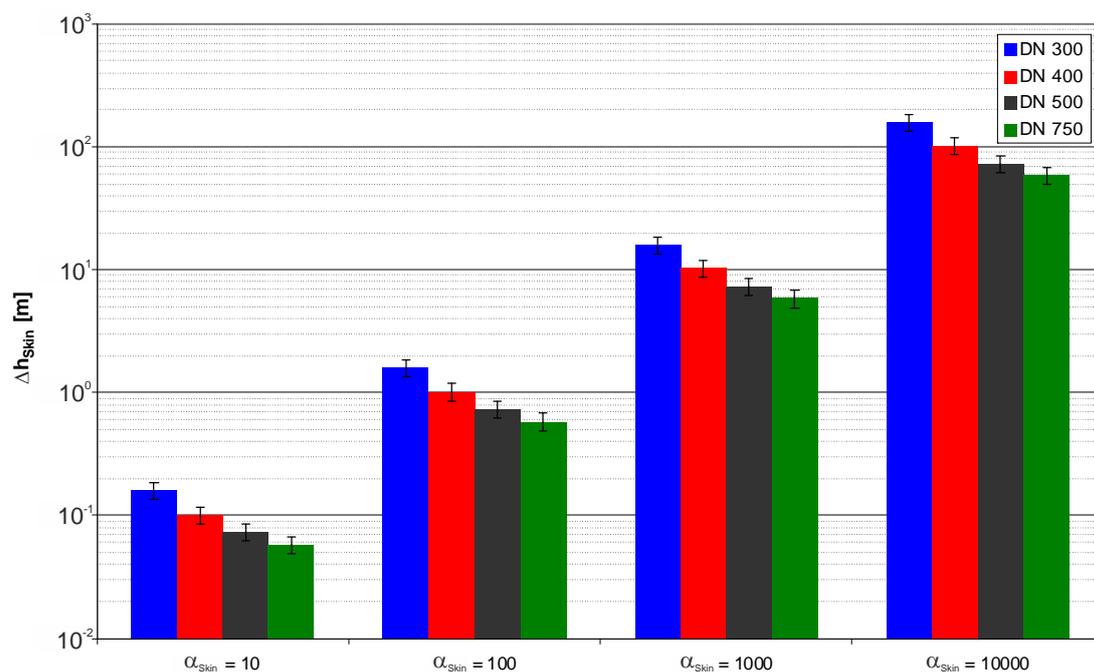


Abbildung 7.9: Vergleich der Druckverlustanteile für verschiedene Verhältnissfaktoren der Skinzone bei  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$  und vier verschiedenen Bohrlochgeometrien

Aufgrund der großen Bandbreite der Ergebnisse erfolgt eine logarithmische Darstellung der Skinzonenerluste auf der y-Achse in Abbildung 7.9. Eine um vier Zehnerpotenzen geringere Durchlässigkeit der Skinzone mit einer angenommenen Dicke von 5 mm führt zu signifikanten Druckverlustanteilen von mehr als 150 m. Für die anderen Varianten ist im Verhältnis dazu nur eine geringe Beeinflussung durch den Skineffekt nachzuweisen. Der Einfluss der Bohrlochgeometrie ist gleichbleibend zu den vorherigen Ergebnissen, da der kleinste Brunnenausbau im Vergleich jeweils die größten Druckverluste aufweist. Auch die Unsicherheit, die sich aus der Variation der ERGUN-Koeffizienten mit der Monte-Carlo-Methode ergibt, liegt wieder bei 16 %.

Es wird in diesem Berechnungsbeispiel davon ausgegangen, dass die Skinzone als abdichtende Schicht ohne Fehlstellen am Bohrloch auftritt, während in der Praxis zum Beispiel zu beo-

bachten ist, dass sich Risse in einem Filterkuchen bilden (vgl. Abbildung 3.14), durch die dann das Wasser mit erhöhter Fließgeschwindigkeit in den Brunnen eindringt. Dieser Effekt wird hier nicht berücksichtigt. Der Einfluss des unsicheren ERGUN-Koeffizienten des Aquifermaterials auf die Skinzone zeigt sich in den Standardabweichungen der Druckverluste.

## 7.4 Bewertung

Die Anwendung des Gesamtmodells aus Kapitel 6.5 für einen gespannten Beispielbrunnen aus der Tagebauentwässerung mit einer Variation geeigneter Eingangsparameter führt zu einer wichtigen Erkenntnis: Der Einfluss der Brunnenausbaumaterialien auf den Gesamtdruckverlust ist sehr gering. Dies verdeutlicht die Abbildung 7.3, welche für eine Entnahmemenge von  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$  die prozentualen Anteile der einzelnen Druckverluste am Gesamtdruckverlust bei der Brunnenanströmung im Nahbereich darstellt. Den größten Widerstandsanteil weist das durchströmte Aquifermaterial auf, gefolgt von dem Druckverlust, welcher durch den Skineffekt hervorgerufen wird. Die Widerstandsanteile aus dem Brunnenausbaumaterial (Filterkies und Filterrohr) sind hingegen sehr gering und betragen weniger als 1 % des Gesamtdruckverlustes.

Der Vergleich verschiedener Bohrlochgeometrien zeigt für fast alle weiteren untersuchten Parameter das gleiche Bild: der größte Bohrlochdurchmesser führt zu den geringsten Druckverlusten, während der kleinste Bohrlochdurchmesser die größten Druckverluste hervorruft. Neben der zu fassenden Wassermenge, welche für die Brunnendimensionierung maßgebend ist, muss somit für eine Brunnenplanung berücksichtigt werden, dass ein größerer Bohrlochdurchmesser die Druckverluste im Brunnennahbereich deutlich reduzieren kann.

Der Skineffekt hat einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtdruckverlust, da ein geringer Skineffekt, z. B. verursacht durch eine um Faktor 10 verringerte Durchlässigkeit, den Gesamtdruckverlust gar nicht beeinflusst, im Gegensatz dazu aber eine stark undurchlässige Skinzone (Faktor 10000) am Bohrloch den Gesamtdruckverlust übermäßig ansteigen lassen kann. Somit ist die Bildung eines Filterkuchens beim Bohrprozess ein sehr sensibler Vorgang für die spätere Brunnenleistung. Auch alterungsbedingte Kolmationsprozesse am Brunnen, welche eine geringdurchlässige Skinzone ausbilden, führen zu einem signifikanten Druckverlust.

Im Vergleich dazu hat die Porosität einen geringeren Einfluss auf den Gesamtdruckverlust. Hierbei muss beachtet werden, dass die Porosität im Aquifermaterial eine gegebene Standortgröße ist und nur im Brunnennahbereich durch Entsandungsmaßnahmen vergrößert werden kann. Die Eindringtiefe verschiedener Entsandungsmaßnahmen ist jedoch nach DVGW (2003) meist auf die ersten 10 cm begrenzt.

Die Variation der Entnahmemengen führt im vorliegenden Anwendungsbeispiel nicht zu einem Regimewechsel im Aquifermaterial. Lediglich im Filterkies findet aufgrund der erhöhten Fließgeschwindigkeiten ein Regimewechsel statt und die Strömung befindet sich im nichtlinear laminaren Bereich. Eine turbulente Anströmung wird jedoch nicht erreicht. Die Auswirkungen dieses Regimewechsels im Filterkies sind vernachlässigbar gering, da nur für den verhältnismäßig kleinen Ringraum ein nichtlineares Anwachsen des Strömungswiderstands auftritt und der Druckverlust im Filterkies nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtdruckverlust hat.

Für das vorliegende Anwendungsbeispiel wird ein homogener Grundwasserleiter mit einer konstanten Durchlässigkeit angenommen, wobei in der Natur durch die Entstehungsgeschichte des Grundwasserleiters meist eine horizontale Schichtung vorliegt. Ein erster Ansatz zur Berücksichtigung der Streuung der Durchlässigkeit der porösen Materialien erfolgt durch die Anwendung der Monte-Carlo-Methode mit den ermittelten ERGUN-Koeffizienten aus Kapitel 6. Für ein gleichbleibendes Aquifermaterial und einen definierten Filterkies wird durch die Monte-Carlo-Methode eine relativ geringe Unsicherheit von maximal 16 % für alle berechneten Druckverluste ermittelt.

Außerdem wird festgestellt, dass erhöhte Fließgeschwindigkeiten im Brunnennahbereich nicht zwangsläufig zu deutlich erhöhten Druckverlusten und damit erhöhten Absenkungen des Brunnenwasserstands führen. Durch die erhöhten Fließgeschwindigkeiten können jedoch Prozesse wie Suffosion oder Kolmation ausgelöst werden, welche den Gesamtdruckverlust nachhaltig beeinflussen.

Die Optimierung eines geplanten Brunnens muss daher neben der geeigneten Auswahl der Brunnenausbaumaterialien eine sehr gute Bauausführung beinhalten, um den Skineffekt möglichst gering zu halten.

## 7.5 Praxisversuche

Seit 2008 werden von der RWE Power AG Untersuchungen im Tagebau Garzweiler durchgeführt, bei denen die Ergebnisse aus den umfangreichen Untersuchungen zum Brunnenausbaumaterial in die Praxis übertragen werden (KLAUDER et al., 2009). Umgesetzt werden zunächst die Erkenntnisse zur Filterkieswahl, indem neue Brunnen mit einer gröberen Verkiesung (FK 1.4-2.2 mm) ausgebaut werden und der Unterkorngehalt der Filterkiese auf unter 10 % begrenzt wird. Zum Vergleich werden in Brunnenreihen jeweils zwei Brunnen mit der Standardverkiesung 0.7-1.4 mm und ein Brunnen mit dem FK 1.4-2.2 mm versehen.

In Abbildung 7.10 ist der Verlauf der Förderleistung und der Absenkung im Brunnen für eine Brunnendreiergruppe seit Inbetriebnahme im Juni 2008 dargestellt. Das erste Betriebsjahr

zeigt ein sehr positives Bild für den Testbrunnen W 5441 mit größerer Verkiesung. Die Absenkung des Grundwasserstands im Brunnen fällt bei deutlich erhöhter Förderleistung geringer aus als bei den benachbarten Brunnen W 5439 und W 5443. Danach geht die Förderleistung jedoch stark zurück und der Wasserstand im Brunnen W 5441 ist stärker abgesenkt als bei den Vergleichsbrunnen. Im Januar 2009 wurde ein Pumpenwechsel durchgeführt, was zu einem deutlichen Peak in der Förderleistung führt.

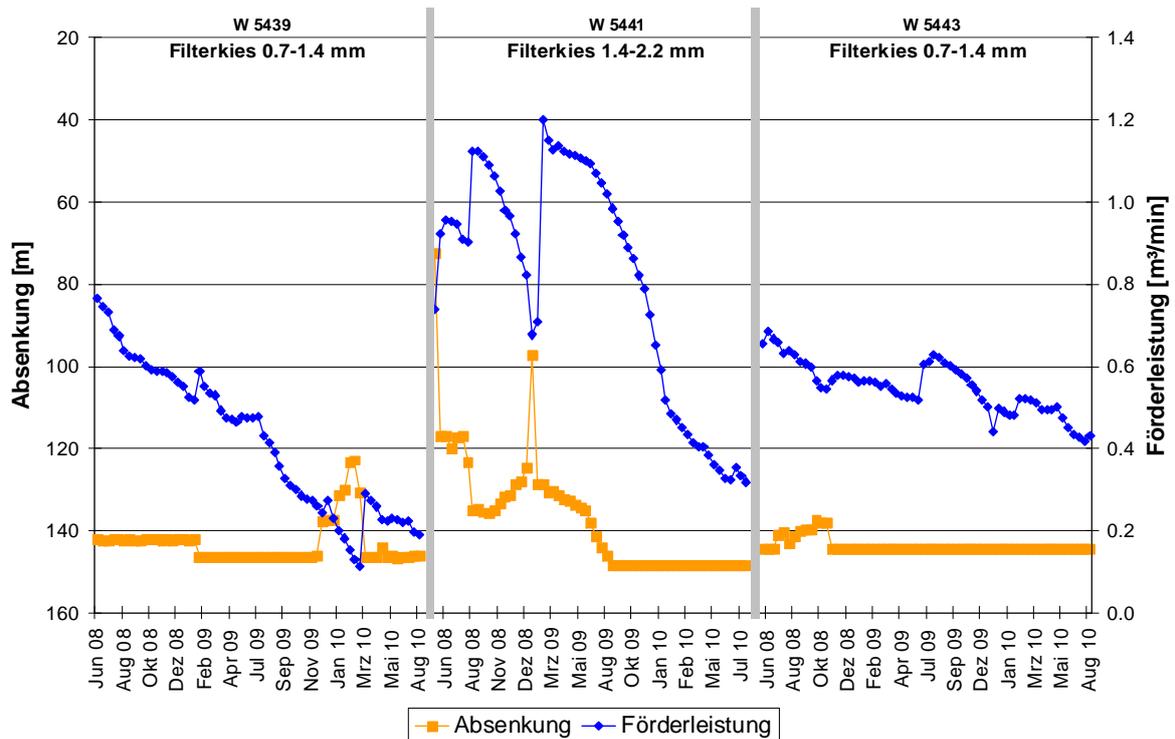


Abbildung 7.10: Ganglinien einer Testbrunnenreihe mit unterschiedlicher Verkiesung im Tagebau Garzweiler

Aufgrund der durchgeführten Brunnenmodellversuche zu Verkiesungen mit Glaskugeln wurde auch ein Testbrunnen im Tagebau Garzweiler mit Glaskugeln ausgebaut. Dieser Brunnen befindet sich ebenso in einer Brunnenreihe mit standardverkiesten Brunnen, so dass ein Vergleich der Förderleistung und Absenkung mit benachbarten Brunnen möglich ist (siehe Abbildung 7.11).

Die mittlere Absenkung der Brunnen beträgt 175.6 m (W 5155), 173.4 m (W 5247) und 171.54 m (W 5309). Somit liegen ungefähr gleiche Absenkungsverhältnisse vor. Die Förderleistung ist bei dem Glaskugelbrunnen deutlich erhöht und bleibt konstant, während die beiden benachbarten Brunnen mit der Zeit eine starke Verringerung der Förderleistung aufweisen. Dies kann ein Indiz für eine Reduzierung der Verockerungsneigung von Glaskugeln sein, wie es von TRESKATIS et al. (2009) prognostiziert wird.

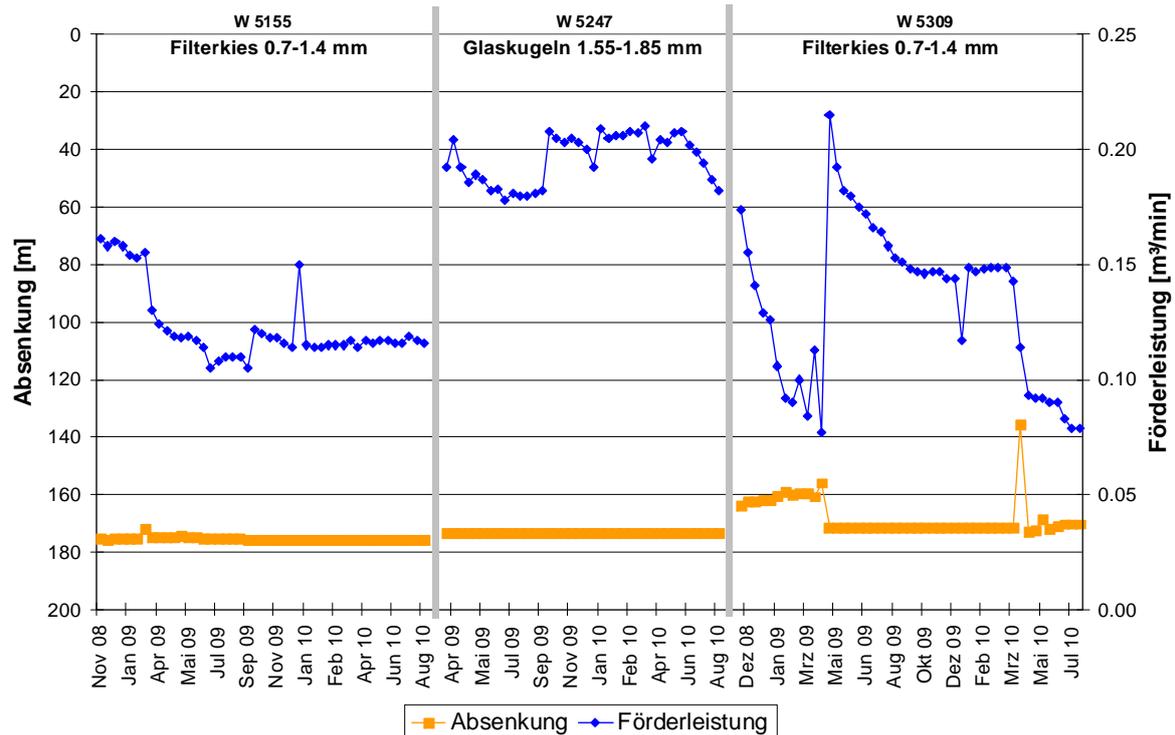


Abbildung 7.11: Ganglinien einer Testbrunnenreihe mit Glaskugelverkiebung im Vergleich zum Filterkies 0.7-1.4 mm im Tagebau Garzweiler

Für insgesamt 19 Testbrunnen mit einer größeren Verkiebung ist die Förderleistung im Vergleich zu den benachbarten Brunnen in Abbildung 7.12 dargestellt. Die Werte wurden für einen Stichtag im Oktober 2009 ermittelt, so dass die Brunnen aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte der Inbetriebnahme zu diesem Stichtag Laufzeiten zwischen 1.5 Jahren und 0.5 Jahren aufweisen. Bei 14 Testbrunnen ist die Förderleistung im Verhältnis zu den Vergleichsbrunnen um durchschnittlich 24 % erhöht, während bei den restlichen 5 Brunnen die Förderleistung gleich ist.

Die beiden vorgestellten Beispiele der Testbrunnen mit größerer Verkiebung zeigen, dass neben einem Vergleich der Förderleistungen benachbarter Brunnen auch der zeitliche Verlauf der Absenkung und Förderleistung betrachtet werden muss. Der erste Beispielbrunnen in Abbildung 7.10 startet zunächst mit deutlich erhöhten Förderleistungen, welche jedoch im zweiten Betriebsjahr stark abnehmen. Hierfür kann es mehrere Erklärungen geben, entweder setzen hier schon früh Alterungserscheinungen wie die Verockerung ein, oder Kolmationsprozesse am Bohrloch oder im Brunnenausbau verstärken einen vorhandenen Skineffekt. Im Gegensatz zu der starken Reduzierung der Förderleistung des ersten Beispielbrunnens zeigt der Glaskugelbrunnen eine konstant erhöhte Förderleistung, wobei die Laufzeit dieses Brunnens bisher nur 1.5 Jahre beträgt. Somit sind neben einem Vergleich von Förderleistun-

gen zu einem Zeitpunkt auch die zeitliche Entwicklung und die Gesamtbetriebsdauer der Brunnen für eine Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung.

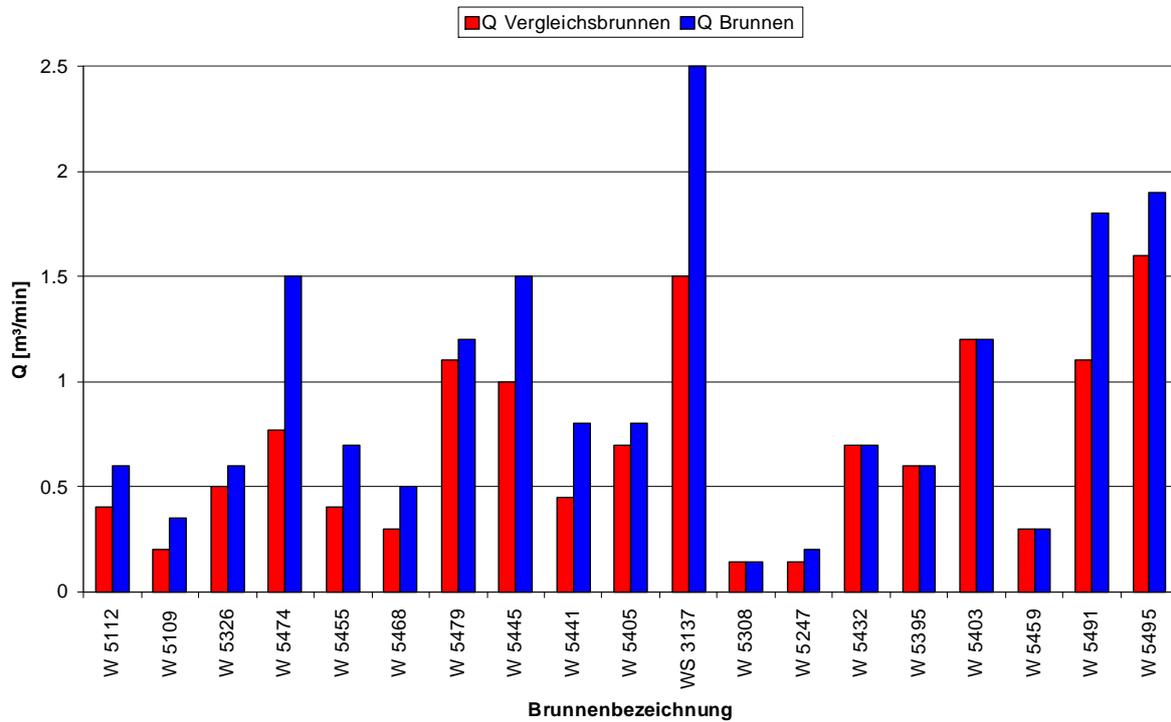


Abbildung 7.12: Vergleich der Förderleistungen zwischen Testbrunnen mit Verkiesung 1.4-2.2 mm und benachbarten Vergleichsbrunnen mit Filterkies 0.7-1.4 mm im Tagebau Garzweiler

Durch die oben dargestellten Auswertungen werden die Ergebnisse aus den Brunnenmodellversuchen in die Praxis übertragen, wobei zu beachten ist, dass die Ergebnisse einen sehr großen Einfluss der Verkiesung auf die Förderleistung zeigen. Dies steht zunächst im Gegensatz zu den Ergebnissen des Anwendungsbeispiel, bei dem die Verkiesung nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtdruckverlust hat, und zeigt die Komplexität der Vorgänge in der Natur im Vergleich zu den Modellversuchen unter konstanten Randbedingungen. Daher werden in Tabelle 7.6 die Randbedingungen des Anwendungsbeispiels den Bedingungen der Praxisversuche im Tagebau gegenübergestellt.

Die Brunnen für das vorgestellte Praxisbeispiel befinden sich nicht in gespannten Grundwasserleitern im Tagebau, so dass neben einer horizontalen Durchströmung eine vertikale Strömungskomponente zu berücksichtigen ist, die zusätzlich eine Sickerstrecke hervorruft. Welchen Einfluss die Verkiesung auf die Größe der Sickerstrecke am Brunnen hat, ist bislang noch nicht untersucht worden.

Tabelle 7.6: Randbedingungen Anwendungsbeispiel gegenüber Verhältnissen im Tagebau

Randbedingung	Anwendungsbeispiel	Praxisversuche Tagebau
Fließverhältnisse	gespannt	ungespannt
Strömungszustand	stationär	instationär
Fließrichtung	horizontal	horizontal und vertikal
Skineffekt $\alpha_{skin}$	100	unbekannt
Sickerstrecke	nicht vorhanden	vorhanden
Entnahmemenge	vorgegeben	abhängig vom Grundwasserstand
Außenradius Aquifermaterial	10 m	unbekannt

Die Brunnenmodellversuche wurden außerdem bei stationären Verhältnissen durchgeführt, während die Praxisversuche unter instationären Randbedingungen ablaufen. Für das Anwendungsbeispiel wird ein moderater Skineffekt angenommen. Welche Skineffekt zum Beispiel aus einem Filterkuchen bei den Brunnen des Praxisversuches zu berücksichtigen sind, ist unbekannt. Der Brunnenausbauwiderstand, hervorgerufen durch die Durchströmung von Filterkies und Filterrohr, hat zwar nur einen geringen Anteil an dem Gesamtdruckverlust. Jedoch können weitere Prozesse wie Kolmation und Skineffekt durch die Wahl der Brunnenausbaumaterialien beeinflusst werden und damit den Gesamtdruckverlust nachhaltig beeinflussen. Die gröbere Verkiesung kann zum Beispiel durch eine Entsandung die Durchlässigkeit des anstehenden Grundwasserleiters in Brunnennähe erhöhen oder die Filterkuchenbildung reduzieren.

Beim Anwendungsbeispiel wird die Entnahmemenge aus dem betrachteten Brunnen vorgegeben, während sich bei den Brunnen des Praxisversuches die Entnahmemenge aus dem Wasserstand des umgebenden Aquifers einstellt. Der Radius des umgebenden Aquifers, der für die Berechnung der Druckverluste beim Anwendungsbeispiel berücksichtigt wird, ist auf 10 m begrenzt, während der Einflussbereich der Entnahme bei den Praxisversuchsbrunnen unbekannt ist.

Somit treten in der Praxis eine Vielzahl von Faktoren, zum Anwendungsbeispiel abweichende Randbedingungen und gegenseitige Beeinflussungen auf, welche die Interpretation von Förderleistungsvergleichen erschweren. Das Ergebnis dieser Praxisversuche ist trotzdem sehr positiv zu bewerten, da grundsätzlich eine Leistungssteigerung durch einen größeren Filterkies erzielt werden konnte. Allerdings sind die Prozesse, die zur Leistungssteigerung führen, ohne weitere Untersuchungen und mit einer Auflösung der unbekanntenen Randbedingungen in Tabelle 7.6 schwierig zu benennen.

## 8 Fazit und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit werden die regimeabhängigen Widerstandsgesetze zur Durchströmung poröser Medien dargelegt und auf die Verhältnisse eines radialen Strömungssystems in Form der Brunnenanströmung übertragen. Grundwasserleiter, Schüttmaterial sowie Filterrohr werden als die drei nacheinander durchströmten Bereiche im Brunnennahbereich eines Vertikalfilterbrunnens im Lockergestein detailliert vorgestellt. Entscheidend ist die Berücksichtigung der möglichen Prozesse an den Trennflächen zwischen diesen Materialien.

Mit den umfangreichen experimentellen Untersuchungen der Brunnenanströmung im Nahbereich im zweiten Teil der Arbeit werden die Grundlagen zur Ableitung eines analytischen Gesamtmodells zur Beschreibung der Strömungsprozesse unter Berücksichtigung aller Verlustkomponenten bei gespannten Verhältnissen geschaffen. Insgesamt werden 49 Versuche mit verschiedenen Filterrohr-Schüttmaterial-Kombinationen in einem eigens hierfür entwickelten zylindrischen Versuchsstand mit vorgelagertem Aquifermaterial durchgeführt. Zunächst werden anhand der Messergebnisse die Koeffizienten der Einzelmaterialien in Abhängigkeit vom ermittelten Strömungsregime berechnet, um damit dann die Gesamtdrucklinie des Modellsystems beschreiben zu können.

Das neu aufgestellte analytische Modell wird abschließend für eine Parameterstudie an einem Brunnen in der Tagebauentwässerung verwendet, um die Auswirkung einzelner Parameter auf den Gesamtdruckverlust bewerten zu können. Die Empfehlungen zur Wahl des Filterkieses werden in ersten Praxisversuchen im Tagebau umgesetzt und zeigen ein vielversprechendes Ergebnis bei Förderleistungsvergleichen.

### 8.2 Wichtige Erkenntnisse

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen zur Reduzierung des Brunnenausbauwiderstands können praxisrelevante Schlussfolgerungen gezogen werden. Der Kiesstabfilter und der Scheibenfilter weisen die größten Durchlässigkeiten der untersuchten Filterrohre auf, wobei der Scheibenfilter aufgrund der fehlenden Kiesbeklebung geeigneter für eine Regenerierung ist. Im Vergleich zu den Filterrohrdruckverlusten sind die Verluste der Verkiesungsstrecke deutlich größer und können durch eine geeignete Materialauswahl signifikant reduziert werden. Außerdem hat der Unterkorngehalt einen sehr großen Einfluss auf den Aus-

bauwiderstand, so dass die Begrenzung des Unterkorngehaltes nach DIN 4924 unbedingt einzuhalten ist.

Grundsätzlich ist eine Übertragung der Widerstandsgesetze von einfachen Strömungssystemen auf komplexe radialsymmetrische Systeme wie die Brunnenanströmung möglich, so dass aus Messergebnissen an einem Brunnenausschnittsmodell die ERGUN-Koeffizienten der porösen Einzelmaterialien bestimmt werden können. Die umfangreichen Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Durchführung der Laborversuche führen zu sehr geringen Standardabweichungen der Messergebnisse. Dennoch ist die Varianz der durch Fehlerquadratminimierung berechneten ERGUN-Koeffizienten gerade für das Aquifermaterial groß. Daraus wird gefolgert, dass diese Koeffizienten zusätzlich von der Packungsstruktur, Kornform und Korngröße abhängen. Über die Parameter Tortuosität und Flächen-Volumen-Formfaktor kann diese Abhängigkeit jedoch nicht berücksichtigt werden, weil bisher keine belastbaren direkten Bestimmungsmethoden für diese Parameter existieren.

Die ERGUN-Koeffizienten sind somit auch zukünftig experimentell zu ermitteln und die Abhängigkeit der Koeffizienten von den Versuchsrandbedingungen ist zu berücksichtigen. Der Vergleich der ermittelten ERGUN-Koeffizienten mit Literaturwerten zeigt die grundsätzliche Eignung der gewählten Vorgehensweise.

Werden Glaskugeln als Schüttmaterial für einen Brunnen verwendet, führt dies bei der vorliegenden Untersuchung zu geringeren Streuungen der Ergebnisse und bestätigt die häufig zitierten Werte der ERGUN-Koeffizienten von ERGUN (1952) und MACDONALD et al. (1979). Für Glaskugeln kann somit ein Wertebereich der ERGUN-Koeffizienten angegeben werden, für den der Einfluss der Packungsstruktur und der Kornform aufgrund der einfachen Kugelgeometrie vernachlässigbar ist. Die Ableitung eines universalen Wertebereichs für ungleichförmige poröse Materialien wie Sand oder Kies ist nicht möglich, weil der Einfluss der spezifischen Kornoberfläche und der Packungsstruktur eine grundsätzliche Aussage hierfür nicht zulässt.

Da ideale Laborbedingungen für die experimentellen Modellversuche im Rahmen dieser Arbeit vorliegen, zeigt die Analyse der Trennflächen zwischen den Einzelmaterialien keine zusätzlichen Druckverluste, die auf Skineffekte oder hydromechanische Bodendeformationen zurückzuführen sind. In der Praxis treten jedoch häufig Skineffekte am Bohrlochrand auf, so dass zusätzliche Trennflächendruckverluste im Gesamtmodell zu berücksichtigen sind. Mit der Einführung der Skinkomponente, basierend auf der infinitesimalen Betrachtungsweise der Skinzone, wird der zusätzliche Druckverlust am Bohrloch quantifizierbar.

Mit dem gewählten kapillaren Porenraummodell und dem erweiterten Konzept des Hydraulischen Radius wird ein theoretisches Gesamtmodell aufgestellt, welches regimeabhängig eine

Ermittlung der Gesamtdruckverluste für gegebene ERGUN-Koeffizienten bei der Brunnenanströmung ermöglicht. Mit diesem Modell kann der Einfluss folgender Parameter auf den Gesamtdruckverlust quantifiziert werden:

- Porosität
- Korngröße
- Entnahmemenge
- Brunnenausbaumaterial (Verkiesung, Filterrohr)
- Bohrlochgeometrie
- Skineffekt

Ein erstes Anwendungsbeispiel des analytischen Modells zeigt, dass die Brunnenausbaumaterialien und die Bohrlochgeometrie einen untergeordneten Einfluss auf den Gesamtwiderstand haben, während der Skineffekt und das standortabhängige Aquifermaterial den Gesamtdruckverlust maßgeblich beeinflussen. Praxisversuche an mehreren Brunnen mit geänderten Verkiesungen dokumentieren, dass ein komplexes Wirkungsgefüge der Einzelkomponenten am Brunnen besteht. Ein größerer Filterkies im Praxisversuch erhöht die mögliche Förderleistung von Entwässerungsbrunnen bei ungespannten Verhältnissen signifikant, wobei die zugrunde liegenden Prozesse hierfür noch weiter untersucht werden müssen. Diese Praxisversuche zeigen somit weitere offene Fragestellungen, aus denen sich der nachfolgend aufgeführte Forschungsbedarf ergibt.

### 8.3 Forschungsbedarf

Da das bestehende Modell für gespannte Strömungsverhältnisse abgeleitet wurde, ist eine Berücksichtigung ungespannter Verhältnisse mit der zusätzlichen Schwierigkeit der vertikalen Strömungskomponente, welche zum Auftreten einer Sickerstrecke führt, vorzunehmen. Die Untersuchung der Sickerstrecke und der sie beeinflussenden Parameter ist von großer Bedeutung für die Erweiterung des bestehenden Modells, da in der Praxis meist ungespannte Verhältnisse vorliegen. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Modell sind jetzt die Voraussetzungen geschaffen, die Einzelverluste bei der Brunnenanströmung analytisch zu beschreiben und damit die bisherigen empirischen Gesamtverlustbeiwerte in die Einzelkomponenten zerlegen zu können. Somit kann in einem nächsten Schritt die Sickerstrecke losgelöst von den anderen Brunneneintrittsverlusten untersucht werden, um die beeinflussenden Parameter eindeutig zu identifizieren.

Für die Ermittlung der ERGUN-Koeffizienten kann die mikroskopische Betrachtungsweise der Prozesse auf der Porenebene neue Einblicke in die Theorie ermöglichen. Numerische Modellierungen auf der Porenebene mit anisotropen, inhomogenen porösen Medien sind hier ein er-

folgversprechender Weg für ein besseres Verständnis der Prozesse auf der Porenebene (WANG et al., 1999; BALHOFF & WHEELER, 2009; DU PLESSIS & WOUDBERG, 2008). Da die numerischen Simulationen in komplexen porösen Geometrien sehr aufwändig und rechenintensiv sind und umfangreiche Hardwareressourcen benötigen, konzentrieren sich diese Simulationen bisher nur auf künstliche poröse Medien mit geringer Teilchenanzahl. Werden jedoch Methoden zur Übertragbarkeit und Messung des mikroskopischen Parameters Tortuosität und der Analyse der Kornform- und Kornoberflächen gefunden, wird eine Ermittlung robuster ERGUN-Koeffizienten möglich. Gerade die Regimeabhängigkeit der Koeffizienten ist durch eine numerische Modellierung gut zu untersuchen. Darüber hinaus müssen weitere Modellversuche mit verschiedenen porösen Medien vorgenommen werden, um die Datengrundlage für eine Validierung der numerischen Porenraummodelluntersuchungen bereitzustellen.

Auch die angenommenen stationären Strömungsverhältnisse können durch eine Erweiterung der LAPLACE-Gleichung mit der zeitlichen Änderung eines Speicherterms ergänzt werden, so dass eine instationäre Brunnenformel vorliegt. Diese instationäre Brunnenformel bildet bisher die Grundlage der Auswertung von Pumpversuchen zur Bestimmung der Durchlässigkeit. Die Berücksichtigung der Anisotropie des Grundwasserleiters bei der Auswertung von Pumpversuchen anhand der analytischen Brunnenformel ist dabei nach SCHNEIDER (2010) zwingend erforderlich. Wird also das infolge der durchgeführten Untersuchungen entwickelte Gesamtmodell erweitert und mit den Erkenntnissen von SCHNEIDER (2010) ergänzt, so steht ein komplexes analytisches Modell zur Auswertung von Pumpversuchen zur Verfügung, welches alle Verlustkomponenten berücksichtigt.

Aufgrund der umfangreichen experimentellen Untersuchungen bietet die vorliegende Arbeit die Basis für die Anwendung eines numerischen Simulationsmodells. Die analytischen Gleichungen sind vorhanden und können mit geeigneten Anfangs- und Randbedingungen numerisch gelöst werden. Die Validierung des numerischen Modells kann dann anhand der vorliegenden Messergebnisse erfolgen. Mit Hilfe eines numerischen Modells können umfangreiche Variantenuntersuchungen vorgenommen werden, so dass neben variablen Modellgeometrien unterschiedliche poröse Medien berücksichtigt werden können. Die modelltechnische Begleitung weiterer Praxisversuche an Brunnen erleichtert außerdem die Interpretation von Förderleistungsvergleichen.

Abschließend sind die Alterungsprozesse am Brunnen als bedeutendes Forschungsfeld zu nennen, da gerade die Verockerung die Leistungsfähigkeit von Brunnen signifikant beeinflusst. Auch der Filterkuchen, welcher sich bei einem Bohrvorgang in der Praxis bildet, verändert die Strömungsprozesse im Brunnennahbereich. Durch die Berücksichtigung eines Skineffektes im vorliegenden Gesamtmodell kann die Reduzierung der Durchlässigkeit auf-

grund einer Verockerung oder eines Filterkuchens zwar abgebildet werden, jedoch sind die grundlegenden Prozesse und die sie beeinflussenden Parameter weitestgehend unerforscht.

Es ist mit der vorliegenden Arbeit gelungen, ein Gesamtmodell für den Fall einer stationären, radialen Brunnenanströmung im gespannten Grundwasserleiter unter Berücksichtigung aller wesentlichen Verlustkomponenten abzuleiten. Mit diesem neu entwickelten Modell ist jetzt die Grundlage geschaffen, auf denen die weiteren Untersuchungen der Strömungsprozesse am Brunnen und die Untersuchung offener Fragen aufbauen können.

## Literaturverzeichnis

- ABBOUD, N. M. & CORAPCIOGLU, M. Y. (1993): *Effect of mud penetration on borehole skin properties*. In: Water Resources Research 29(8): 2941-2950. – ISSN 0043-1397
- AHMED, N. & SUNADA, D. K. (1969): *Nonlinear flow in porous media*. In: Journal of the Hydraulics Division – ASCE: HY 95(6): 1847-1857. – ISSN 0044-796X
- BALHOFF, M. T. & WHEELER, M. F. (2009): *A predictive pore-scale model for non-Darcy flow in porous media*. In: SPE Journal 14(4): 579-587. – ISSN 1086-055X
- BALKE, K. D.; KIRSCH, R.; MATTHES, G. (2000): *Grundwassererschließung: Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht*. Berlin: Borntraeger. – ISBN 3-443-01014-8
- BARAK, A. Z. (1987): *High velocity flow in porous-media - Comments*. In: Transport in Porous Media 2(6): 533-535. – ISSN 0169-3913
- BARKER, J. A. & HERBERT, R. (1992): *A simple theory for estimating well losses: with application to test wells in Bangladesh*. In: Hydrogeology Journal 0(0): 20-31. – ISSN 1435-0157
- BARRASH, W.; CLEMO, T.; FOX, J. J.; JOHNSON, T. C. (2006): *Field, laboratory, and modeling investigation of the skin effect at wells with slotted casing, Boise Hydrogeophysical Research Site*. In: Journal of Hydrology 326(1-4): 181-198. – ISSN 0022-1694
- BEAR, J. (1972): *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover. – ISBN 0-486-65675-6
- BEAR, J. (1979): *Hydraulics of groundwater*. New York: McGraw-Hill Book Comp. – ISBN 0-07-004170-9
- BERGMANN, H. (1970): *Über die Grundwasserabsenkung am Filterrohr*. Graz, Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur der TU Graz, Dissertation.
- BIDAUX, P. & TSANG, C. F. (1991): *Fluid flow patterns around a well bore or an underground drift with complex skin effects*. In: Water Resources Research 27(11): 2993-3008. – ISSN 0043-1397
- BIESKE, E.; RUBBERT, W.; TRESKATIS, C. (1998): *Bohrbrunnen*. München: Oldenbourg. – ISBN 3-486-26388-9
- BLAKE, F. C. (1922): *The resistance of packing to fluid flow*. In: Transactions of the American Institute of Chemical Engineers 14: 415-421. – ISSN 0096-7408
- BOLLRICH, G. (2007): *Technische Hydromechanik; Bd. 1*. Berlin: Huss-Medien. – ISBN 978-3-345-00912-9
- BOS, M. G. (1989): *Discharge measurement structures*. Wageningen, Niederlande, ILRI Publikation 20. – ISBN 90-70754-15-0
- BOSOLD, H. (1965): *Experimentelle Untersuchungen zu den hydraulischen Verhältnissen vollkommener Brunnen und ihr praktischer Aussagewert*. In: WWT 15(6): 191-196. – ISSN 0043-0986

- BOULTON, N. S. (1951): *The flow pattern near a gravity well in a uniform water-bearing medium*. In: Journal of the Institution of Civil Engineers 36(10): 534-550. – ISSN 0368-2455
- BURCHARTH, H. F. & ANDERSEN, O. H. (1995): *On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equations*. In: Coastal Engineering 24(3-4): 233-257. – ISSN 0378-3839
- BURKE, S. P. & PLUMMER, W. B. (1928): *Gas flow through packed columns*. In: Industrial & Engineering Chemistry 20(11): 1196-1200. – ISSN 0019-7866
- BUSCH, K. F.; LUCKNER, L.; TIEMER, K. (1993): *Geohydraulik*. Berlin: Borntraeger. – ISBN 3-443-01004-0
- CARMAN, P. C. (1937): *Fluid flow through granular beds*. In: Transactions of the Institution of Chemical Engineers 15: 150-166. – ISSN 0096-7408
- CASSIANI, G.; KABALA, Z. J.; MEDINA, M. A. (1999): *Flowing partially penetrating well: solution to a mixed-type boundary value problem*. In: Advances in Water Resources 23(1): 59-68. – ISSN 0309-1708
- CHANG, M.; TRUSSELL, R. R.; GUZMAN, V.; MARTINEZ, J.; DELANEY, C. K. (1999): *Laboratory studies on the clean bed headloss of filter media*. In: Journal of Water Supply Research and Technology – Aqua 48(4): 137-145. – ISSN 0003-7214
- CHAPUIS, R. P. & AUBERTIN, M. (2003): *On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils*. In: Canadian Geotechnical Journal 40(3): 616-628. – ISSN 0008-3674
- CHAUVETEAU, G.; THIRRIOT, C. (1967): *Régimes d'écoulement en milieu poreux et limite de la loi de Darcy*. In: La Houille Blanche 12(2): 141-147. – ISSN 0018-6368
- CHEN, Z. X.; LYONS, S. L.; QIN, G. (2001): *Derivation of the Forchheimer law via homogenization*. In: Transport in Porous Media 44(2): 325-335. – ISSN 0169-3913
- CHHABRA, R. P. (2007): *Bubbles, drops, and particles in non-Newtonian fluids*. Boca Raton: CRC, Taylor & Francis. – ISBN 0-8247-2329-5
- CLARK, L. & TURNER, P. A. (1983): *Experiments to assess the hydraulic efficiency of well screens*. In: Ground Water 21(3): 270-281. – ISSN 0017-467X
- COMITI, J. & RENAUD, M. (1989): *A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements: application to beds packed with parallelepipedal particles*. In: Chemical Engineering Science 44(7): 1539-1545. – ISSN 0009-2509
- COMITI, J.; SABIRI, N. E.; MONTILLET, A. (2000): *Experimental characterization of flow regimes in various porous media - III: limit of Darcy's or creeping flow regime for Newtonian and purely viscous non-Newtonian fluids*. In: Chemical Engineering Science 55(15): 3057-3061. – ISSN 0009-2509
- COOLEY, R. L. & CUNNINGHAM, A. B. (1979): *Consideration of total energy loss in theory of flow to wells*. In: Journal of Hydrology 43(1-4): 161-184. – ISSN 0022-1694
- DAGAN, G. (1989): *Flow and transport in porous formations*. Berlin: Springer. – ISBN 3-540-51098-2

- DARCY, H. (1856): *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau ; ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitume*. Paris: Dalmont.
- DE ZWART, A. H.; VAN BEEK, K.; HOUBEN, G. J.; TRESKATIS, C. (2006): *Mechanische Partikelfiltration als Ursache der Brunnenalterung, Teil 1*. In: bbr 57(7-8): 42-49. – ISSN 1611-1478
- DE ZWART, A. H. (2007): *Investigation of clogging processes in unconsolidated aquifers near water supply wells*. Delft, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Dissertation.
- DIN 4049-3 (1994): *Hydrologie Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 4922 (1978): *Stahlfilterrohre für Bohrbrunnen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 4924 (1998): *Sande und Kiese für den Brunnenbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 4935 (2002): *Wickeldrahtfilterrohre aus nicht rostendem Stahl für Brunnen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN ISO 3310-1 (2001): *Analysensiebe : Technische Anforderungen und Prüfung Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 18130-1 (1998): *Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts Teil 1: Laborversuche*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DROST, W.; KLOTZ, D.; KOCH, A.; MOSER, H.; NEUMAIER, F.; RAUERT, W. (1968): *Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes*. In: Water Resources Research 4(1): 125-146. – ISSN 0043-1397
- DU PLESSIS, J. P. (1994): *Analytical quantification of coefficients in the Ergun equation for fluid friction in a packed bed*. In: Transport in Porous Media 16(2): 189-207. – ISSN 0169-3913
- DU PLESSIS, J. P. & WOUDBERG, S. (2008): *Pore-scale derivation of the Ergun equation to enhance its adaptability and generalization*. In: Chemical Engineering Science 63(9): 2576-2586. – ISSN 0009-2509
- DUPUIT, J. E. J. (1863): *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. Paris: Dunod.
- DVGW (2003): *DVGW-Forschungsvorhaben W 55/99 – Brunnenregenerierung*.
- DVGW W 113 (2001): *Bestimmung des Schüttkorndurchmessers und hydrogeologischer Parameter aus der Korngrößenverteilung für den Bau von Brunnen*. Bonn: Wirtschafts- u. Verl.ges. Gas u. Wasser, DVGW-Regelwerk: Merkblatt W 113.
- DVGW W 118 (2005): *Bemessung von Vertikalfilterbrunnen*. Bonn: Wirtschafts- u. Verl.ges. Gas u. Wasser, DVGW-Regelwerk: Merkblatt W 118.

- DYBBS, A. & EDWARDS, R. V. (1984): *A new look at porous media fluid mechanics - Darcy to turbulent*. In: Fundamentals of transport phenomena in porous media : Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Mechanics of Fluids in Porous Media, Newark, Delaware, USA, 18.-27. Juli 1982. Hrsg.: Bear, J., Dordrecht: Nijhoff. – ISBN 90-247-2982-3
- EARLOUGHER, R. C. (1977): *Advances in well test analysis*. New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. – ISBN 0-89520-204-2
- EHRENBERGER, R. (1928): *Versuche über die Ergiebigkeit von Brunnen und Bestimmung der Durchlässigkeit des Sandes*. Wien: Hydrographisches Zentralbureau, Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft, Sonderdruck aus: Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architektenvereines 9/10, 11/12 u. 13/14.
- EISFELD, B. & SCHNITZLEIN, K. (2001): *The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds*. In: Chemical Engineering Science 56(14): 4321-4329. – ISSN 0009-2509
- ENGELUND, F. (1953): *On the laminar and turbulent flows of ground water through homogenous sand*. Kopenhagen: Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences.
- ERGUN, S. (1952): *Fluid flow through packed columns*. In: Chemical Engineering Progress 48(2): 89-94. – ISSN 0360-7275
- EWING, R. E.; LAZAROV, R. D.; LYONS, S. L.; PAPAVALASSIOU, D. V.; PASCIAK, J.; QIN, G. (1999): *Numerical well model for non-Darcy flow through isotropic porous media*. In: Computational Geosciences 3(3-4): 185-204. – ISSN 1420-0597
- FAIR, G. M. & HATCH, L. P. (1933): *Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand*. In: Journal American Water Works Association 25(11): 1551-1565. – ISSN 0003-150X
- FAND, R. M.; KIM, B. Y. K.; LAM, A. C. C.; PHAN, R. T. (1987): *Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres*. In: Journal of Fluids Engineering – Transactions of the ASME 109(3): 268-274. – ISSN 0098-2202
- FIRDAOUSS, M.; GUERMOND, J. L.; LEQUERE, P. (1997): *Nonlinear corrections to Darcy's law at low Reynolds numbers*. In: Journal of Fluid Mechanics 343: 331-350. – ISSN 0022-1120
- FORCHHEIMER, P. (1901): *Wasserbewegung durch Boden*. In: Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 45(50): 1781-1788. – ISSN 0341-7255
- FORKEL, C. (2004): *Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis. Grundlagen, Anwendungen, Qualitätsaspekte*. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft: Mitteilungen; 130. (Zugl.: Aachen, RWTH, Habilitationsschrift). – ISBN 3-8322-3082-3
- FOURAR, M.; RADILLA, G.; LENORMAND, R.; MOYNE, C. (2004): *On the non-linear behavior of a laminar single-phase flow through two and three-dimensional porous media*. In: Advances in Water Resources 27(6): 669-677. – ISSN 0309-1708
- FREEDMAN, D. & DIACONIS, P. (1981): *On the histogram as A density estimator - L2 theory*. In: Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete 57(4): 453-476. – ISSN 0044-3719

- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. (1979): *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.  
– ISBN 0-13-365312-9
- FUCHS, G. (1963): *Die wirksamste Abstufung von künstlichen Kiesschüttungen in den Filterstrecken bei Bohrbrunnen*. In: Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, 60: 65-95.
- GARG, S. P. & LAL, J. (1971): *Rational design of well screens*. In: Journal of the Irrigation and Drainage Division – ASCE 97(1): 131-147. – ISSN 0044-7978
- GEISELER, W. D. (1967): *Über die Strömungsvorgänge bei Vertikalfilterrohrbrunnen mit einfachen Kiesschüttungen unter besonderer Berücksichtigung der Leistungssteigerung durch Entsandern*. Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, 65.
- HADJHAMOU, T.; TAVASSOLI, M. R.; SHERMAN, W. C. (1990): *Laboratory testing of filters and slot sizes for relief wells*. In: Journal of Geotechnical Engineering – ASCE 116(9): 1325-1346. – ISSN 0733-9410
- HAGEN, G. (1839): *Ueber die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren*. In: Annalen der Physik und Chemie 122(3): 423-442. – ISSN 0003-3804
- HANTUSH, M. (2003): Wells, Hydraulics of. In *Encyclopedia of water science*, Hrsg. Stewart, B. A.; Howell, T. A. New York: Dekker. – ISBN 0-8247-0948-9
- HASSANIZADEH, S. M. & GRAY, W. G. (1987): *High velocity flow in porous media*. In: Transport in Porous Media 2(6): 521-531. – ISSN 0169-3913
- HAYES, R. E.; AFACAN, A.; BOULANGER, B. (1995): *An equation of motion for an incompressible Newtonian fluid in a packed bed*. In: Transport in Porous Media 18(2): 185-198. – ISSN 0169-3913
- HERRMANN, F. (2008): *Einsatz von Glaskugeln als Ersatz für Filterkies in Brunnen*. In: bbr(5): 48-53. – ISSN 1611-1478
- HERTH, W. & ARNDTS, E. (1985): *Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung*. Berlin: Ernst, Verl. f. Architektur u. techn. Wiss. – ISBN 3-433-00994-5
- HLUSHKOU, D. & TALLAREK, U. (2006): *Transition from creeping via viscous-inertial to turbulent flow in fixed beds*. In: Journal of Chromatography A 1126(1-2): 70-85. – ISSN 0021-9673
- HOUBEN, G. J. & TRESKATIS, C. (2003): *Regenerierung und Sanierung von Brunnen*. München: Oldenbourg Industrieverl. – ISBN 3-486-26545-8
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2005): *Hydrogeologie - Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie*. München: Spektrum Akademischer Verlag. – ISBN 3-8274-1526-8
- HUBBERT, M. K. (1956): *Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids*. In: AIME Petroleum Transactions 207: 222-239. – ISSN 0081-1696
- HUBER, N. P. (2008): *Probabilistische Modellierung von Versagensprozessen bei Staudämmen*. Aachen, RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Dissertation.

- JACOB, C. E. (1947): *Drawdown test to determine effective radius of artesian well*. In: Transactions of the ASCE 112: 1047-1064. – ISSN 0066-0604
- KABALA, Z. J. & CASSIANI, G. (1997): *Well hydraulics with the Weber-Goldstein transforms*. In: Transport in Porous Media 29(2): 225-246. – ISSN 0169-3913
- KANY, M. & HEINISCH, H. (1977): *Wasserdurchlässigkeit und Filtereigenschaften fester poröser Körper*. Berlin: Ernst. – ISBN 3-433-00777-2
- KEARL, P. M. (1997): *Observations of particle movement in a monitoring well using the colloidal borescope*. In: Journal of Hydrology 200(1-4): 323-344. – ISSN 0022-1694
- KLAUDER, W.; ROGER, S.; ADENAU, W.; MÜLLER, C.; SCHÜTTRUMPF, H. (2009): *Durchführung von Filterversuchen - Wissenschaftliche Untersuchung zur Optimierung der Brunnenfilter*. In: bbr 60(6): 40-46. – ISSN 1611-1478
- KLOTZ, D. (1969): *Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften von Filterrohren*. In: bbr 20(9): 327-336. – ISSN 1611-1478
- KLOTZ, D. (1971): *Untersuchung von Grundwasserströmungen durch Modellversuche im Maßstab 1:1*. In: Geologica Bavarica 64: 75-119.
- KOCH, A.; KLOTZ, D.; MOSER, H. (1967): *Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie*. In: Atomkernenergie 12(9-10): 361-369. – ISSN 0004-7147
- KOROM, S. F.; BEKKER, K. F.; HELWEG, O. J. (2003): *Influence of pump intake location on well efficiency*. In: Journal of Hydrologic Engineering 8(4): 197-203. – ISSN 1084-0699
- KOZENY, J. (1927): *Über Grundwasserbewegung*. In: Wasserkraft und Wasserwirtschaft 22(5): 67-70.
- LANGGUTH, H. R. & VOIGT, R. (2004): *Hydrogeologische Methoden*. Berlin: Springer. – ISBN 3-540-21126-8
- LEHMANN, U. (1968): *Der Einfluß von Filterkies und Brunnenrohr auf die Bemessung eines vollkommenen Brunnens*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der TU Hannover, 31, 81-199.
- LEHNERS, C. (1993): *Analyse von Strömungen in wassergesättigten Kornhaufwerken*. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, 121.
- LINDQUIST, E. (1933): *On the flow of water through porous soil*. In: 1er Congrès des Grands Barrages, Stockholm: 81-101.
- LIU, S. J. & MASLIYAH, J. H. (1996): *Single fluid flow in porous media*. In: Chemical Engineering Communications 150: 653-732. – ISSN 0098-6445
- LUDEWIG, M. (1967): *Untersuchungen über die Gültigkeitsgrenzen des Darcyschen Gesetzes bei Sanden und Kiesen*. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig 3: 151-164.

- LUMB, P. (1966): *The variability of natural soils*. In: Canadian Geotechnical Journal 3(2): 74-97. – ISSN 0008-3674
- MA, H. & RUTH, D. W. (1993): *The microscopic analysis of high Forchheimer number flow in porous media*. In: Transport in Porous Media 13(2): 139-160. – ISSN 0169-3913
- MACDONALD, I. F.; ELSAYED, M. S.; MOW, K.; DULLIEN, F. A. L. (1979): *Flow through porous media - the Ergun equation revisited*. In: Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals 18(3): 199-208. – ISSN 0196-4313
- MAECKELBURG, D. (1966): *Vergleichende Betrachtung der Widerstandsgesetze und Kenngrößen für die Strömung in Rohren, Kugelschüttungen und beliebigem Schüttgut mit besonderer Untersuchung von Sand-Kies-Gemischen*. Berlin, TU Berlin, Fakultät. f. Bauingenieurw., Dissertation.
- MASSEY, F. J. (1951): *The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit*. In: Journal of the American Statistical Association 46(253): 68-78. – ISSN 0162-1459
- MATHIAS, S. A.; BUTLER, A. P.; ZHAN, H. B. (2008): *Approximate solutions for Forchheimer flow to a well*. In: Journal of Hydraulic Engineering – ASCE 134(9): 1318-1325. – ISSN 0733-9429
- MEI, C. C. & AURIAULT, J. L. (1991): *The effect of weak inertia on flow through a porous medium*. In: Journal of Fluid Mechanics 222: 647-663. – ISSN 0022-1120
- MOENCH, A. F. & HSIEH, P. A. (1985): *Evaluation of slug tests in wells containing a finite-thickness skin - Comment*. In: Water Resources Research 21(9): 1459-1461. – ISSN 0043-1397
- MOUTSOPOULOS, K. N.; PAPASPYROS, I. N. E.; TSIHRINTZIS, V. A. (2009): *Experimental investigation of inertial flow processes in porous media*. In: Journal of Hydrology 374(3-4): 242-254. – ISSN 0022-1694
- MUSKAT, M. (1937): *The flow of homogeneous fluids through porous media*. Boston: International Human Resources Development Corp. – ISBN 0-934634-16-5
- NAGY, I. V. & KARADI, G. (1961): *Untersuchungen über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes von Darcy*. In: Österreichische Wasserwirtschaft: OeWW 13(12): 281-287. – ISSN 0029-9588
- NAHRGANG, G. (1965): *Über die Anströmung von Vertikalbrunnen mit freier Oberfläche im einförmig homogenen sowie im geschichteten Grundwasserleiter*. Berlin: Schriftenreihe des Deutschen Arbeitskreises Wasserforschung e.V., 6.
- NEMEC, D. & LEVEC, J. (2005): *Flow through packed bed reactors: 1. Single-phase flow*. In: Chemical Engineering Science 60(24): 6947-6957. – ISSN 0009-2509
- NIVEN, R. K. (2002): *Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidised beds*. In: Chemical Engineering Science 57(3): 527-534. – ISSN 0009-2509
- NOVAKOWSKI, K. S. (1989): *A composite analytical model for analysis of pumping tests affected by well bore storage and finite thickness skin*. In: Water Resources Research 25(9): 1937-1946. – ISSN 0043-1397

- NOVAKOWSKI, K. S. (1990): *Analysis of aquifer tests conducted in fractured rock - A review of the physical background and the design of a computer-program for generating type curves*. In: Ground Water 28(1): 99-107. – ISSN 0017-467X
- OZAHİ, E.; GUNDOĞDU, M. Y.; CARPINLIOĞLU, M. O. (2008): *A modification on Ergun's correlation for use in cylindrical packed beds with non-spherical particles*. In: Advanced Powder Technology 19(4): 369-381. – ISSN 0921-8831
- PAPULA, L. (2008): *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3 : Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. – ISBN 978-3-8348-0225-5
- PARK, E. & ZHAN, H. B. (2002): *Hydraulics of a finite-diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect*. In: Advances in Water Resources 25(4): 389-400. – ISSN 0309-1708
- PETERSEN, J. S.; ROHWER, C.; ALBERTSON, M. L. (1955): *Effect of well screens on flow into wells*. In: Transactions of the ASCE 120: 563-585. – ISSN 0066-0604
- PLATE, E. J. (1993): *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. Berlin: Ernst, Verl. für Architektur und techn. Wiss. – ISBN 3-433-01073-0
- POISEUILLE, J. L. M. (1843): *Experimentelle Untersuchungen über die Bewegung der Flüssigkeiten in Röhren von sehr kleinen Durchmessern*. In: Annalen der Physik und Chemie 134(3): 424-448. – ISSN 0003-3804
- RAMEY, H. J. & AGARWAL, R. G. (1972): *Annulus unloading rates as influenced by wellbore storage and skin effect*. In: Society of Petroleum Engineers Journal 12(5): 453-462. – ISSN 0197-7520
- REDDY, N. B. P. & RAO, P. R. M. (2004): *Convergence effect on the flow resistance in porous media*. In: IE Journal-CV 85: 36-43. – ISSN 0020-336X
- REDDY, N. B. P. (2005): *Effect of converging boundaries on flow through porous media*. In: Journal of Porous Media 8(5): 529-539. – ISSN 1091-028X
- REDDY, N. B. P. & RAO, P. R. M. (2006): *Effect of convergence on nonlinear flow in porous media*. In: Journal of Hydraulic Engineering – ASCE 132(4): 420-427. – ISSN 0733-9429
- REDDY, N. B. P. (2006): *Effect of convergence factors on flow through porous media in converging boundaries*. In: Journal of Porous Media 9(2): 109-126. – ISSN 1091-028X
- REICHELDT, W. (1972): *Zur Berechnung des Druckverlustes einphasig durchströmter Kugel- und Zylinderschüttungen*. In: Chemie Ingenieur Technik 44(18): 1068-1071. – ISSN 0009-286X
- ROSE, H. E. (1945): *An investigation into the laws of flow of fluids through beds of granular materials*. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 153: 141-148. – ISSN 0020-3483
- RUBBERT, T. & WOHNLICH, S. (2006): *Visualisierung von Brunneneintrittsverlusten am physikalischen Pumpversuchsmodell*. In: bbr(6): 46-52. – ISSN 1611-1478

- RUMPF, H. & GUPTA, A. R. (1971): *Einflüsse der Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenströmung*. In: Chemie Ingenieur Technik 43(6): 367-375. – ISSN 0009-286X
- RUUD, N. C. & KABALA, Z. J. (1997): *Numerical evaluation of the flowmeter test in a layered aquifer with a skin zone*. In: Journal of Hydrology 203(1-4): 101-108. – ISSN 0022-1694
- SAGEEV, A. (1986): *Slug test analysis*. In: Water Resources Research 22(8): 1323-1333. – ISSN 0043-1397
- SCHEIDEGGER, A. E. (1974): *The physics of flow through porous media*. Toronto: Univ. of Toronto Press. – ISBN 0-8020-1849-1. – ISSN 0021-8979
- SCHNEEBELI, G. (1955): *Experiments on the range of validity of Darcy's law and the appearance of turbulence in a filtering flow*. In: La Houille Blanche 10(2): 141-149. – ISSN 0018-6368
- SCHNEIDER, G. (2010): *Der vollkommene Brunnen in einem geneigten anisotropen Grundwasserleiter*. München: Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, 145. – ISBN 978-3-940476-30-2
- SCHÜTTRUMPF, H.; KLAUDER, W.; ROGER, S. (2009). *Durchführung von Filterversuchen – Wissenschaftliche Untersuchung zur Optimierung der Brunnenfilter*. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Projektbericht (unveröffentlicht).
- SCHULER, U. (1997): *Bemessung von Erdstoff-Filtern unter besonderer Berücksichtigung der Parameterstreuung*. Karlsruhe: Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik, 143. – ISSN 0453-3267
- SHEPHERD, R. G. (1989): *Correlations of permeability and grain size*. In: Ground Water 27(5): 633-638. – ISSN 0017-467X
- SIDIROPOULOU, M. G.; MOUTSOPOULOS, K. N.; TSIHRINTZIS, V. A. (2007): *Determination of Forchheimer equation coefficients a and b*. In: Hydrological Processes 21(4): 534-554. – ISSN 0885-6087
- SINGH, S. R. & SHAKYA, S. K. (1989): *A nonlinear equation for groundwater entry into well screens*. In: Journal of Hydrology 109(1-2): 95-114. – ISSN 0022-1694
- SKJETNE, E. & AURIAULT, J. L. (1999): *High-velocity laminar and turbulent flow in porous media*. In: Transport in Porous Media 36(2): 131-147. – ISSN 0169-3913
- SOLIMAN, M. M. (1965): *Boundary flow considerations in the design of wells*. In: Journal of the Irrigation and Drainage Division – ASCE 91(1): 159-177. – ISSN 0044-7978
- STAUFFER, Fritz. (1998): *Strömungsprozesse im Grundwasser : Konzepte und Modelle*. Zürich, vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH. – ISBN 3-7281-2641-1
- STERNBERG, Y. M. (1973): *Well efficiency and skin effect*. In: Journal of the Irrigation and Drainage Division – ASCE 99(2): 203-206. – ISSN 0044-7978
- STREET, R. L.; WATTERS, G. Z.; VENNARD, J. K. (1996): *Elementary fluid mechanics*. New York: Wiley. – ISBN 0-471-01310-2.

- STROEVEN, P.; HU, J.; GUO, Z. (2009): *Shape assessment of particles in concrete technology: 2D image analysis and 3D stereological extrapolation*. In: *Cement & Concrete Composites* 31(1): 84-91. – ISSN 0958-9465
- STRUCKMEIER, W.; FRANKEN, G.; HAUT, F.-R.; HIMMELSBACH, T.; SCHELKES, K.; SCHWARZ, F.; ZAEPKE, M. (2003): *Grundwasser*. Commodity Top News.
- TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1961): *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*. Berlin: Springer.
- TESSENDORFF, H. (1962): *Untersuchungen zum Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen*. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin; 57.
- THIRUVENGADAM, M. & KUMAR, G. N. P. (1997): *Validity of Forchheimer equation in radial flow through coarse granular media*. In: *Journal of Engineering Mechanics – ASCE* 123(7): 696-705. – ISSN 0733-9399
- TODD, D. K. (1959): *Ground water hydrology*. New York: Wiley.
- TRESKATIS, C. (1996): *Entwicklung eines planungstechnischen Leitfadens für die Dimensionierung von Vertikalfilterbrunnen im Lockergestein*. In: *bbr* 47(7): 40-45. – ISSN 1611-1478
- TRESKATIS, C.; VOLGNANDT, P.; WESSOLLEK, H.; PURONPÄÄ-SCHÄFER, P.; GERBL-RIEGER, S.; BLANK, K. H. (1998): *Anforderungsprofile an den wirtschaftlichen Bau und Betrieb von Bohrbrunnen*. In: *Grundwasser* 3(3): 117-128. – ISSN 1430-483X
- TRESKATIS, C.; HEIN, C.; PEIFFER, S.; HERRMANN, F. (2009): *Brunnenalterung: Sind Glaskugeln eine Alternative zum Filterkies nach DIN 4924?* In: *bbr* 60(4): 36-44. – ISSN 1611-1478
- TRUSSELL, R. R. & CHANG, M. (1999): *Review of flow through porous media as applied to head loss in water filters*. In: *Journal of Environmental Engineering* 125(11): 998-1006. – ISSN 0733-9372
- UNESCO (2006): *Water : a shared responsibility*. The United Nations world water development report, 2. – ISBN 92-3-104006-5
- UPADHYAY, K. K. (1977): *Nonlinear laminar flow into well partially penetrating a porous aquifer of finite thickness*. In: *Pure and Applied Geophysics* 115(3): 631-638. – ISSN 0033-4553
- VALDÉS-PARADA, F.; PORTER, M.; WOOD, B. (2010): *The role of tortuosity in upscaling*. In: *Transport in Porous Media*, online veröffentlicht <http://dx.doi.org/10.1007/s11242-010-9613-9>
- VALENTIN, F. (1970): *Nicht-lineares Widerstandsverhalten poröser Medien*. Mitteilungen des Instituts für Hydraulik und Gewässerkunde, TU München; H. 6.
- VAN EVERDINGEN, A. F. (1953): *The skin effect and its influence on the productive capacity of a well*. In: *AIME Petroleum Transactions* 198: 171-176. – ISSN 0081-1696
- VENKATARAMAN, P. & RAO, P. R. M. (2000): *Validation of Forchheimer's law for flow through porous media with converging boundaries*. In: *Journal of Hydraulic Engineering – ASCE* 126(1): 63-71. – ISSN 0733-9429

- WAHYUDI, I.; MONTILLET, A.; KHALIFA, A. O. A. (2002): *Darcy and post-Darcy flows within different sands*. In: Journal of Hydraulic Research 40(4): 519-525. – ISSN 0022-1686
- WALDE, M. (1966): *Untersuchungen zur Filterhydraulik und Entwässerungswirkung verschiedener Filterbauformen in der Tagebauentwässerung*. Freiberg, Bergakademie, Dissertation.
- WANG, X.; THAUVIN, F.; MOHANTY, K. K. (1999): *Non-Darcy flow through anisotropic porous media*. In: Chemical Engineering Science 54(12): 1859-1869. – ISSN 0009-2509
- WARD, J. C. (1964): *Turbulent flow in porous media*. In: Journal of the Hydraulics Division 90(HY5): 1-12. – ISSN 0044-796X
- WENDLING, G.; CHAPUIS, R. P.; GILL, D. E. (1997): *Quantifying the effects of well development in unconsolidated material*. In: Ground Water 35(3): 387-393. – ISSN 0017-467X
- WHITAKER, S. (1986): *Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law*. In: Transport in Porous Media 1(1): 3-25. – ISSN 0169-3913
- WHITAKER, S. (1996): *The Forchheimer equation: A theoretical development*. In: Transport in Porous Media 25(1): 27-61. – ISSN 0169-3913
- WILLIAMS, D. E. (1985): *Modern techniques in well design*. In: Journal American Water Works Association 77(9): 68-74. – ISSN 0003-150X
- WILLIAMS, E. B. (1981): *Fundamental concepts of well design*. In: Ground Water 19(5): 527-542. – ISSN 0017-467X
- WITTMANN, L. (1980): *Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien*. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana, 86.
- WOOD, B. D. (2007): *Inertial effects in dispersion in porous media*. In: Water Resources Research 43(12): W12S16. – ISSN 0043-1397
- WRIGHT, D. E. (1968): *Nonlinear flow through granular media*. In: Journal of the Hydraulics Division – ASCE: HY(4): 851-872. – ISSN 0044-796X
- WU, J. S.; YU, B. M.; YUN, M. J. (2008): *A resistance model for flow through porous media*. In: Transport in Porous Media 71(3): 331-343. – ISSN 0169-3913
- WYCKOFF, R. D.; BOTSET, H. G.; MUSKAT, M. (1932): *Flow of liquids through porous media under the action of gravity*. In: Physics 3(2): 90-113. – ISSN 0148-6349
- YAMADA, H.; NAKAMURA, F.; WATANABE, Y.; MURAKAMI, M.; NOGAMI, T. (2005): *Measuring hydraulic permeability in a streambed using the packer test*. In: Hydrological Processes 19(13): 2507-2524. – ISSN 0885-6087
- YU, J. A.; ZHANG, M. C.; FAN, W. D.; ZHOU, Y. G.; ZHAO, G. F. (2002): *Study on performance of the ball packed-bed regenerator: experiments and simulation*. In: Applied Thermal Engineering 22(6): 641-651. – ISSN 1359-4311

- ZIEMS, J. (1967): *Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber Wirkungen des Sickerwassers*. In: WWT 17(2):50-55. – ISSN 0043-0986
- ZIEMS, J. (1969): *Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe*. Dresden, TU Dresden, Sektion Wasserwesen, Dissertation.

## A Versuchsergebnisse

Folgende Definitionen für die Standardabweichung  $\sigma$  und Mittelwertbildung für  $n$  Messwerte  $x_i$  werden im Rahmen der gesamten Arbeit verwendet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{mit } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Für die Ermittlung indirekter Größen, wie zum Beispiel Druckdifferenzen, wird das Varianzfortpflanzungsmodell nach Gleichung (A.2) zur Berechnung der Standardabweichung zugrunde gelegt.

$$\sigma_{diff} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (\text{A.2})$$

Für alle durchgeführten Versuchskonfigurationen finden sich in den folgenden Tabellen jeweils die gemittelten Messwerte mit der zugehörigen Standardabweichung in Klammern.

Tabelle A.1: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 1

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.55 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	831.3 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	836.7 (6.6·10 <sup>-2</sup> )
1.43 (5.1·10 <sup>-3</sup> )	834.8 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	856.1 (1.2·10 <sup>-1</sup> )
2.16 (2.4·10 <sup>-2</sup> )	837.1 (8.9·10 <sup>-2</sup> )	872.8 (1.8·10 <sup>-1</sup> )
2.53 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	838.5 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	886.8 (3.5·10 <sup>-1</sup> )
3.14 (2.9·10 <sup>-2</sup> )	841.3 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	914.2 (4.7·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.2: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 2

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.46 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	828.9 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	855.6 (1.7)	862.3 (1.6)	1107.1 (1.1)
0.93 (1.6·10 <sup>-3</sup> )	830.9 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	888.6 (3.6)	901.7 (2.9)	1386.6 (1.9)
1.85 (4.4·10 <sup>-3</sup> )	834.4 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	962.0 (7.3)	988.4 (6.2)	1921.7 (4.0)
3.01 (2.7·10 <sup>-2</sup> )	839.6 (1.0·10 <sup>-2</sup> )	1074.0 (13.0)	1116.8 (10.7)	2586.2 (6.8)

Tabelle A.3: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 3

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.30 (1.2·10 <sup>-3</sup> )	825.6 (6.1·10 <sup>-2</sup> )	835.1 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	840.0 (1.0)	1011.1 (6.8·10 <sup>-1</sup> )
0.45 (2.3·10 <sup>-3</sup> )	826.4 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	841.5 (4.0·10 <sup>-1</sup> )	848.6 (1.4)	1104.7 (8.2·10 <sup>-1</sup> )
0.76 (3.0·10 <sup>-3</sup> )	827.2 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	854.7 (7.1·10 <sup>-1</sup> )	867.0 (2.6)	1293.2 (1.8)
1.52 (5.8·10 <sup>-3</sup> )	830.3 (0.1)	892.9 (1.4)	919.1 (6.3)	1740.4 (4.2)
2.29 (1.8·10 <sup>-2</sup> )	833.3 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	937.1 (2.1)	975.0 (8.4)	2178.6 (5.9)
2.97 (2.5·10 <sup>-2</sup> )	837.5 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	988.8 (2.7)	1038.0 (10.4)	2582.4 (6.5)
3.33 (3.4·10 <sup>-2</sup> )	839.3 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	1022.3 (3.1)	1079.2 (12.1)	2803.2 (6.7)

Tabelle A.4: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 4

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.32 (1.0·10 <sup>-3</sup> )	825.6 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	837.9 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	843.7 (9.3·10 <sup>-1</sup> )	1010.9 (1.1)
0.48 (1.5·10 <sup>-3</sup> )	826.6 (5.8·10 <sup>-2</sup> )	845.6 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	854.3 (1.3)	1103.9 (1.6)
0.81 (4.1·10 <sup>-3</sup> )	827.8 (5.7·10 <sup>-2</sup> )	861.6 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	876.1 (2.1)	1286.8 (2.3)
1.61 (6.5·10 <sup>-3</sup> )	831.1 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	908.3 (5.3·10 <sup>-1</sup> )	937.4 (3.7)	1728.1 (3.2)
2.38 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	834.4 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	961.7 (1.3)	1005.5 (4.6)	2146.9 (3.9)
3.06 (3.0·10 <sup>-2</sup> )	837.8 (9.5·10 <sup>-2</sup> )	1021.9 (2.1)	1078.7 (5.5)	2543.0 (6.3)

Tabelle A.5: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 5

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.38 (2.3·10 <sup>-3</sup> )	826.4 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	847.3 (9.0)	857.1 (1.4)	1108.8 (1.3)
0.79 (3.3·10 <sup>-3</sup> )	827.5 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	877.6 (9.4)	891.3 (2.8)	1390.7 (1.9)
1.30 (4.9·10 <sup>-3</sup> )	829.8 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	922.2 (10.4)	941.3 (4.6)	1756.0 (3.0)
1.93 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	832.3 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	983.0 (10.9)	1008.7 (6.3)	2197.8 (4.8)
2.54 (1.5·10 <sup>-2</sup> )	835.5 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	1047.3 (14.2)	1081.7 (7.6)	2624.9 (6.2)
2.90 (2.3·10 <sup>-2</sup> )	837.2 (9.5·10 <sup>-2</sup> )	1090.5 (11.7)	1126.6 (8.4)	2880.0 (8.7)

Tabelle A.6: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 6

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.49 (2.0·10 <sup>-3</sup> )	827.1 (2.0·10 <sup>-1</sup> )	836.7 (4.9·10 <sup>-1</sup> )	843.3 (8.7·10 <sup>-1</sup> )	1105.4 (2.4)
1.00 (4.3·10 <sup>-3</sup> )	829.1 (7.9·10 <sup>-2</sup> )	851.2 (1.0)	864.5 (1.7)	1385.2 (5.3)
1.49 (6.2·10 <sup>-3</sup> )	831.2 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	868.5 (1.7)	888.4 (2.8)	1653.9 (8.7)
2.00 (1.0·10 <sup>-2</sup> )	832.5 (9.8·10 <sup>-2</sup> )	887.0 (2.5)	913.4 (3.9)	1919.6 (11.8)
3.2 (2.7·10 <sup>-2</sup> )	838.0 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	947.3 (4.8)	991.4 (6.9)	2583.0 (18.1)

Tabelle A.7: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 7

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.30 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	831.1 (6.1·10 <sup>-2</sup> )	835.9 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	838.8 (1.0)	1011.8 (2.7)
0.46 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	831.9 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	839.9 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	844.2 (1.5)	1104.0 (3.5)
0.95 (3.2·10 <sup>-3</sup> )	834.3 (5.8·10 <sup>-2</sup> )	854.0 (5.6·10 <sup>-1</sup> )	863.4 (3.1)	1376.6 (6.6)
1.59 (7.1·10 <sup>-3</sup> )	837.0 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	878.0 (1.2)	894.5 (4.1)	1722.4 (12.0)
2.33 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	840.8 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	913.8 (1.9)	938.9 (5.1)	2130.6 (15.8)
3.02 (3.3·10 <sup>-2</sup> )	844.5 (9.2·10 <sup>-2</sup> )	955.2 (2.6)	989.8 (5.8)	2515.2 (20.5)

Tabelle A.8: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 8

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.54 (2.1·10 <sup>-3</sup> )	829.1 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	830.9 (8.7·10 <sup>-2</sup> )
1.25 (6.0·10 <sup>-3</sup> )	832.1 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	838.1 (1.5·10 <sup>-1</sup> )
1.92 (1.6·10 <sup>-2</sup> )	834.3 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	846.1 (2.0·10 <sup>-1</sup> )
2.60 (1.7·10 <sup>-2</sup> )	837.0 (8.4·10 <sup>-2</sup> )	856.5 (3.7·10 <sup>-1</sup> )
3.24 (3.5·10 <sup>-2</sup> )	839.9 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	868.4 (4.5·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.9: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 9

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.32 (1.2·10 <sup>-3</sup> )	826.4 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	831.1 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	834.7 (1.0)	1007.3 (5.7)
0.48 (2.2·10 <sup>-3</sup> )	827.1 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	834.5 (4.1·10 <sup>-1</sup> )	839.9 (1.5)	1101.8 (3.6)
0.97 (4.0·10 <sup>-3</sup> )	829.1 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	845.8 (8.7·10 <sup>-1</sup> )	857.1 (2.6)	1376.2 (4.8)
1.62 (6.5·10 <sup>-3</sup> )	831.7 (5.7·10 <sup>-2</sup> )	862.4 (1.6)	881.2 (3.8)	1718.9 (6.0)
2.41 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	834.9 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	886.3 (2.6)	914.4 (5.5)	2141.9 (9.6)
3.15 (2.6·10 <sup>-2</sup> )	838.6 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	912.5 (3.7)	949.6 (7.4)	2534.8 (8.5)

Tabelle A.10: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 10

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.29 (9.6·10 <sup>-4</sup> )	831.3 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	834.5 (2.8·10 <sup>-1</sup> )	838.1 (4.2·10 <sup>-1</sup> )	872.1 (4.2)	969.2 (3.7)	1009.7 (1.0)
0.45 (1.5·10 <sup>-3</sup> )	832.0 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	837.1 (4.3·10 <sup>-1</sup> )	842.6 (6.3·10 <sup>-1</sup> )	900.6 (4.5)	1044.7 (4.4)	1103.3 (1.4)
0.93 (2.8·10 <sup>-3</sup> )	834.5 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	846.6 (1.0)	857.8 (1.7)	983.6 (4.8)	1266.3 (7.2)	1378.2 (2.1)
1.57 (5.2·10 <sup>-3</sup> )	837.1 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	860.9 (1.8)	880.5 (2.8)	1091.8 (5.6)	1549.9 (9.6)	1730.2 (2.2)
2.34 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	840.4 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	881.8 (2.8)	912.6 (5.9)	1226.3 (8.1)	1896.9 (15.8)	2153.2 (1.3)
3.06 (3.3·10 <sup>-2</sup> )	844.0 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	905.8 (4.0)	946.6 (8.7)	1355.1 (8.6)	2222.3 (19.5)	2557.6 (3.3)

Tabelle A.11: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 11

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.55 (2.9·10 <sup>-3</sup> )	830.2 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	831.2 (8.5·10 <sup>-2</sup> )
1.30 (6.5·10 <sup>-3</sup> )	833.3 (4.8·10 <sup>-2</sup> )	835.8 (1.1·10 <sup>-1</sup> )
2.01 (1.6·10 <sup>-2</sup> )	836.0 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	840.1 (2.4·10 <sup>-1</sup> )
2.67 (2.2·10 <sup>-2</sup> )	838.7 (5.6·10 <sup>-2</sup> )	844.6 (3.0·10 <sup>-1</sup> )
3.33 (4.0·10 <sup>-2</sup> )	841.1 (8.6·10 <sup>-2</sup> )	849.2 (4.4·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.12: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 12

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.50 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	829.1 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	847.4 (3.3)	856.2 (5.1·10 <sup>-1</sup> )	1100.9 (3.1)
1.56 (7.5·10 <sup>-3</sup> )	833.5 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	895.9 (2.8)	917.8 (1.9)	1628.4 (9.6)
2.07 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	835.5 (9.3·10 <sup>-2</sup> )	921.0 (2.1)	948.8 (3.0)	1879.6 (12.2)
3.32 (3.9·10 <sup>-2</sup> )	840.8 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	988.0 (2.5)	1032.1 (5.8)	2496.7 (23.3)

Tabelle A.13: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 13

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>1</sub> [mm] r = 210 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.28 (7.3·10 <sup>-4</sup> )	832.0 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	833.6 (1.9·10 <sup>-1</sup> )	834.3 (1.9·10 <sup>-1</sup> )	835.6 (2.0·10 <sup>-1</sup> )	840.8 (4.3·10 <sup>-1</sup> )	882.0 (1.8)	1014.1 (3.7)
0.42 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	832.5 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	834.9 (2.2·10 <sup>-1</sup> )	836.0 (2.5·10 <sup>-1</sup> )	837.9 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	845.8 (5.8·10 <sup>-1</sup> )	907.0 (2.6)	1102.8 (5.3)
0.88 (2.6·10 <sup>-3</sup> )	834.7 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	839.9 (4.0·10 <sup>-1</sup> )	842.0 (4.1·10 <sup>-1</sup> )	846.0 (5.0·10 <sup>-1</sup> )	861.9 (1.1)	985.5 (5.1)	1380.2 (8.8)
1.50 (6.5·10 <sup>-3</sup> )	837.3 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	846.4 (6.6·10 <sup>-1</sup> )	850.2 (6.6·10 <sup>-1</sup> )	856.8 (8.0·10 <sup>-1</sup> )	883.4 (1.9)	1086.5 (7.8)	1732.4 (18.3)
2.27 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	840.3 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	854.9 (1.0)	860.6 (1.0)	870.9 (1.3)	909.6 (2.2)	1209.1 (11.5)	2160.4 (27.0)
2.99 (2.9·10 <sup>-2</sup> )	843.7 (8.3·10 <sup>-2</sup> )	864.1 (1.5)	871.9 (1.4)	886.0 (1.7)	935.5 (3.0)	1327.2 (14.6)	2562.4 (32.8)

Tabelle A.14: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 14

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.31 (8.3·10 <sup>-4</sup> )	832.0 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	835.0 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	840.6 (5.5·10 <sup>-1</sup> )	868.4 (24.5)	898.6 (53.7)	1000.7 (12.6)
0.49 (1.2·10 <sup>-3</sup> )	832.8 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	837.5 (1.7·10 <sup>-1</sup> )	846.2 (6.3·10 <sup>-1</sup> )	894.4 (31.7)	992.2 (40.9)	1097.6 (12.5)
1.02 (2.5·10 <sup>-3</sup> )	835.1 (6.4·10 <sup>-2</sup> )	844.9 (3.0·10 <sup>-1</sup> )	862.6 (1.4)	975.2 (39.9)	1218.0 (37.4)	1370.0 (12.4)
1.72 (5.9·10 <sup>-3</sup> )	837.9 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	855.4 (4.1·10 <sup>-1</sup> )	884.5 (3.1)	1090.8 (34.1)	1520.4 (27.3)	1719.9 (10.5)
2.57 (1.5·10 <sup>-2</sup> )	841.4 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	869.5 (7.5·10 <sup>-1</sup> )	912.4 (4.4)	1224.7 (34.8)	1856.8 (26.9)	2137.8 (6.6)
3.36 (3.9·10 <sup>-2</sup> )	844.9 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	884.0 (1.3)	940.5 (6.3)	1362.3 (25.6)	2185.7 (17.3)	2515.5 (9.3)

Tabelle A.15: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 15

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.31 (9.8·10 <sup>-4</sup> )	832.1 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	836.3 (2.5·10 <sup>-1</sup> )	839.2 (3.4·10 <sup>-1</sup> )	845.7 (7.9·10 <sup>-1</sup> )	888.4 (6.7·10 <sup>-1</sup> )	979.4 (1.2)	1013.1 (1.2)
0.48 (2.2·10 <sup>-3</sup> )	832.8 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	839.1 (3.6·10 <sup>-1</sup> )	843.4 (5.2·10 <sup>-1</sup> )	853.3 (1.3)	917.6 (1.1)	1054.3 (1.8)	1104.9 (1.9)
1.01 (4.1·10 <sup>-3</sup> )	835.6 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	848.7 (6.9·10 <sup>-1</sup> )	857.5 (1.1)	877.8 (2.5)	1005.4 (2.3)	1277.4 (3.6)	1378.3 (3.7)
1.68 (8.3·10 <sup>-3</sup> )	838.4 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	860.8 (1.2)	875.4 (1.8)	909.6 (4.7)	1114.9 (4.1)	1553.2 (6.13)	1718.8 (5.5)
2.51 (1.6·10 <sup>-2</sup> )	841.8 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	876.8 (2.0)	899.2 (2.9)	949.1 (7.1)	1247.9 (5.6)	1884.5 (8.9)	2124.6 (7.7)
3.25 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	845.3 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	893.5 (2.7)	923.8 (4.0)	988.9 (9.3)	1374.3 (6.9)	2196.0 (11.5)	2505.6 (9.7)

Tabelle A.16: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 16

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.23 (9.5·10 <sup>-4</sup> )	832.0 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	835.0 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	835.1 (7.6·10 <sup>-2</sup> )	839.3 (3.3·10 <sup>-1</sup> )	871.2 (5.6·10 <sup>-1</sup> )	939.3 (2.4·10 <sup>-1</sup> )	964.4 (4.5·10 <sup>-1</sup> )
0.35 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	832.3 (2.4·10 <sup>-1</sup> )	835.3 (2.2·10 <sup>-1</sup> )	836.9 (2.4·10 <sup>-1</sup> )	843.3 (5.3·10 <sup>-1</sup> )	890.7 (8.6·10 <sup>-1</sup> )	992.3 (4.3·10 <sup>-1</sup> )	1029.8 (7.0·10 <sup>-1</sup> )
0.74 (2.6·10 <sup>-3</sup> )	834.0 (7.9·10 <sup>-2</sup> )	840.1 (2.0·10 <sup>-2</sup> )	843.4 (2.3·10 <sup>-1</sup> )	856.7 (1.1)	953.0 (1.6)	1159.0 (8.2·10 <sup>-1</sup> )	1236.5 (1.9)
1.30 (6.2·10 <sup>-3</sup> )	836.1 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	847.2 (3.6·10 <sup>-1</sup> )	853.1 (4.1·10 <sup>-1</sup> )	876.2 (2.1)	1040.8 (2.5)	1393.0 (1.5)	1526.2 (3.5)
1.96 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	838.7 (9.6·10 <sup>-2</sup> )	856.0 (6.2·10 <sup>-1</sup> )	865.0 (6.5·10 <sup>-1</sup> )	899.2 (3.1)	1140.5 (3.4)	1655.9 (2.5)	1850.9 (5.3)
2.53 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	841.6 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	865.1 (8.5·10 <sup>-1</sup> )	876.8 (9.1·10 <sup>-1</sup> )	920.3 (3.8)	1227.1 (3.9)	1879.7 (2.6)	2128.4 (6.8)
3.27 (4.1·10 <sup>-2</sup> )	845.0 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	877.3 (1.2)	892.9 (1.2)	948.5 (4.6)	1343.9 (4.9)	2181.8 (3.4)	2500.1 (8.6)

Tabelle A.17: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 17

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm
0.19 (8.7·10 <sup>-4</sup> )	832.6 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	838.4 (4.6·10 <sup>-1</sup> )	845.0 (5.6)	846.2 (9.7·10 <sup>-1</sup> )	955.3 (3.2·10 <sup>-1</sup> )	1019.2 (1.9)
0.29 (1.0·10 <sup>-3</sup> )	832.7 (8.6·10 <sup>-2</sup> )	841.6 (6.7·10 <sup>-1</sup> )	849.7 (4.1)	853.4 (1.4)	1018.8 (4.6·10 <sup>-1</sup> )	1115.8 (2.9)
0.60 (1.8·10 <sup>-3</sup> )	834.4 (5.8·10 <sup>-2</sup> )	852.2 (1.3)	864.7 (2.7)	876.2 (2.9)	1208.6 (8.9·10 <sup>-1</sup> )	1404.0 (5.6)
1.03 (2.8·10 <sup>-3</sup> )	836.2 (6.4·10 <sup>-2</sup> )	866.7 (2.1)	887.9 (4.5)	907.3 (5.0)	1460.0 (1.5)	1784.3 (8.7)
1.57 (5.1·10 <sup>-3</sup> )	838.5 (8.9·10 <sup>-2</sup> )	885.5 (3.0)	918.0 (6.8)	946.9 (7.5)	1769.8 (2.1)	2251.8 (12.5)
2.11 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	840.6 (8.8·10 <sup>-2</sup> )	904.8 (3.8)	949.3 (9.2)	987.2 (10.1)	2072.3 (3.0)	2706.4 (15.8)
2.65 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	843.1 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	924.9 (4.6)	981.1 (11.4)	1028.5 (12.8)	2367.5 (3.9)	3148.3 (19.0)
3.17 (3.0·10 <sup>-2</sup> )	845.4 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	946.0 (5.2)	1012.5 (12.4)	1070. (15.2)	2656.4 (4.2)	3580.3 (21.7)

Tabelle A.18: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 18

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm
0.22 (8.3·10 <sup>-4</sup> )	832.5 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	834.6 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	835.8 (2.0·10 <sup>-1</sup> )	839.5 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	953.1 (1.6)	1018.4 (1.2)
0.34 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	833.0 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	836.1 (2.4·10 <sup>-1</sup> )	838.0 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	843.5 (4.5·10 <sup>-1</sup> )	1017.8 (2.5)	1118.1 (1.9)
0.69 (1.6·10 <sup>-3</sup> )	834.4 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	840.8 (4.9·10 <sup>-1</sup> )	844.7 (5.2·10 <sup>-1</sup> )	856.2 (8.1·10 <sup>-1</sup> )	1205.3 (4.9)	1406.5 (3.6)
1.06 (2.8·10 <sup>-3</sup> )	836.0 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	845.8 (7.6·10 <sup>-1</sup> )	851.7 (7.9·10 <sup>-1</sup> )	868.7 (1.4)	1390.3 (7.3)	1690.7 (5.4)
1.42 (4.6·10 <sup>-3</sup> )	837.3 (6.1·10 <sup>-2</sup> )	850.9 (1.0)	858.9 (1.1)	881.6 (1.8)	1570.7 (9.4)	1967.0 (6.9)
2.41 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	841.2 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	865.4 (1.9)	879.3 (2.0)	915.8 (3.7)	2041.0 (15.8)	2685.6 (10.7)
3.00 (2.2·10 <sup>-2</sup> )	843.7 (9.5·10 <sup>-2</sup> )	875.3 (2.4)	892.8 (2.7)	938.8 (4.2)	2326.8 (18.9)	3120.2 (12.8)
3.63 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	846.3 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	885.7 (3.0)	907.2 (3.3)	962.7 (4.9)	2604.1 (22.6)	3540.9 (14.9)

Tabelle A.19: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 19

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm	h <sub>10</sub> [mm] r = 770 mm
0.40 (8.9·10 <sup>-4</sup> )	836.1 (6.1·10 <sup>-2</sup> )	838.9 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	840.5 (1.7·10 <sup>-1</sup> )	845.5 (4.0·10 <sup>-1</sup> )	892.5 (2.9)	1052.8 (1.3)	1167.5 (1.0)
0.65 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	837.4 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	841.8 (2.3·10 <sup>-1</sup> )	844.4 (2.6·10 <sup>-1</sup> )	852.2 (6.2·10 <sup>-1</sup> )	925.8 (4.6)	1177.0 (2.0)	1356.9 (1.5)
1.15 (4.0·10 <sup>-3</sup> )	839.6 (6.4·10 <sup>-2</sup> )	847.4 (4.4·10 <sup>-1</sup> )	851.8 (4.9·10 <sup>-1</sup> )	865.0 (1.1)	988.9 (7.8)	1411.0 (3.5)	1713.1 (2.5)
1.72 (7.9·10 <sup>-3</sup> )	841.7 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	853.6 (6.9·10 <sup>-1</sup> )	860.2 (7.8·10 <sup>-1</sup> )	879.8 (1.7)	1059.5 (11.3)	1671.9 (5.1)	2109.4 (3.6)
2.15 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	843.4 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	858.8 (8.7·10 <sup>-1</sup> )	867.1 (9.9·10 <sup>-1</sup> )	891.5 (2.2)	1112.5 (13.9)	1865.1 (6.3)	2402.3 (4.5)
2.78 (2.1·10 <sup>-2</sup> )	846.5 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	867.2 (1.2)	878.2 (1.3)	910.1 (2.9)	1192.1 (17.5)	2149.3 (8.3)	2833.2 (5.9)
3.33 (2.8·10 <sup>-2</sup> )	849.0 (9.6·10 <sup>-2</sup> )	875.3 (1.5)	888.9 (1.6)	927.9 (3.6)	1265.9 (20.6)	2410.0 (10.1)	3228.6 (7.9)

Tabelle A.20: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 20

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm	h <sub>10</sub> [mm] r = 770 mm
0.40 (9.2·10 <sup>-4</sup> )	834.9 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	837.7 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	839.4 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	844.5 (1.9·10 <sup>-1</sup> )	884.8 (4.3)	1027.4 (3.5)	1132.0 (2.7)
0.40 (8.5·10 <sup>-4</sup> )	835.4 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	838.5 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	840.4 (1.8·10 <sup>-1</sup> )	846.1 (2.4·10 <sup>-1</sup> )	888.1 (4.3)	1035.6 (3.4)	1142.9 (2.6)
0.66 (2.2·10 <sup>-3</sup> )	836.0 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	840.6 (1.9·10 <sup>-1</sup> )	843.4 (2.2·10 <sup>-1</sup> )	851.8 (3.4·10 <sup>-1</sup> )	916.9 (7.0)	1146.9 (5.6)	1315.9 (4.4)
0.67 (2.1·10 <sup>-3</sup> )	835.7 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	840.5 (1.7·10 <sup>-1</sup> )	843.3 (2.2·10 <sup>-1</sup> )	851.8 (3.5·10 <sup>-1</sup> )	917.6 (6.9)	1149.6 (5.4)	1319.6 (4.3)
0.67 (2.2·10 <sup>-3</sup> )	836.6 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	841.8 (2.2·10 <sup>-1</sup> )	844.8 (2.9·10 <sup>-1</sup> )	854.1 (4.2·10 <sup>-1</sup> )	922.4 (7.0)	1162.2 (5.4)	1336.6 (4.2)
1.15 (3.3·10 <sup>-3</sup> )	837.9 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	846.1 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	850.9 (3.6·10 <sup>-1</sup> )	865.4 (6.0·10 <sup>-1</sup> )	975.5 (11.6)	1363.6 (9.0)	1647.9 (7.1)
1.16 (5.0·10 <sup>-3</sup> )	838.5 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	847.3 (3.0·10 <sup>-1</sup> )	852.4 (4.1·10 <sup>-1</sup> )	867.6 (6.7·10 <sup>-1</sup> )	980.9 (11.4)	1377.9 (8.7)	1668.8 (6.8)
1.16 (3.1·10 <sup>-3</sup> )	838.3 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	846.7 (3.0·10 <sup>-1</sup> )	851.5 (4.0·10 <sup>-1</sup> )	865.9 (5.8·10 <sup>-1</sup> )	976.3 (11.8)	1366.1 (9.4)	1652.5 (7.4)
1.74 (8.5·10 <sup>-3</sup> )	840.1 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	853.5 (4.6·10 <sup>-1</sup> )	861.0 (6.1·10 <sup>-1</sup> )	883.4 (1.0)	1048.2 (16.6)	1625.7 (12.3)	2048.8 (9.4)
1.78 (9.6·10 <sup>-3</sup> )	840.9 (5.0·10 <sup>-2</sup> )	854.2 (4.4·10 <sup>-1</sup> )	861.7 (6.0·10 <sup>-1</sup> )	883.7 (8.7·10 <sup>-1</sup> )	1048.2 (17.5)	1628.4 (13.9)	2054.0 (11.0)
1.78 (7.3·10 <sup>-3</sup> )	839.8 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	853.1 (4.7·10 <sup>-1</sup> )	860.6 (6.1·10 <sup>-1</sup> )	882.8 (9.7·10 <sup>-1</sup> )	1048.3 (17.4)	1630.7 (13.3)	2056.9 (10.3)
2.16 (1.0·10 <sup>-2</sup> )	842.5 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	859.2 (5.5·10 <sup>-1</sup> )	868.3 (7.4·10 <sup>-1</sup> )	895.1 (1.1)	1092.0 (20.9)	1786.1 (16.5)	2294.6 (13.2)
2.17 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	841.1 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	857.7 (5.6·10 <sup>-1</sup> )	866.9 (7.3·10 <sup>-1</sup> )	894.0 (1.2)	1093.3 (20.5)	1792.5 (15.7)	2303.9 (12.2)
2.17 (9.6·10 <sup>-3</sup> )	841.6 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	858.5 (5.6·10 <sup>-1</sup> )	867.8 (7.4·10 <sup>-1</sup> )	895.5 (1.3)	1097.0 (20.4)	1803.2 (15.6)	2321.0 (11.5)
2.76 (2.5·10 <sup>-2</sup> )	844.9 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	867.3 (7.3·10 <sup>-1</sup> )	879.3 (9.8·10 <sup>-1</sup> )	914.1 (1.4)	1162.5 (26.2)	2037.7 (20.6)	2676.3 (17.2)
2.76 (1.7·10 <sup>-2</sup> )	843.9 (8.3·10 <sup>-2</sup> )	866.3 (7.3·10 <sup>-1</sup> )	878.4 (9.6·10 <sup>-1</sup> )	913.9 (1.6)	1166.7 (26.0)	2053.8 (19.6)	2703.0 (14.5)
2.77 (1.7·10 <sup>-2</sup> )	843.8 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	866.0 (7.2·10 <sup>-1</sup> )	878.0 (9.6·10 <sup>-1</sup> )	913.2 (1.6)	1164.7 (25.6)	2046.6 (19.7)	2691.1 (15.1)
3.26 (3.7·10 <sup>-2</sup> )	847.1 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	875.0 (9.1·10 <sup>-1</sup> )	889.6 (1.2)	931.6 (1.8)	1225.1 (30.8)	2258.3 (24.4)	3011.1 (20.4)
3.32 (3.7·10 <sup>-2</sup> )	846.3 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	874.6 (9.1·10 <sup>-1</sup> )	889.6 (1.2)	933.2 (2.0)	1237.0 (31.0)	2300.5 (23.4)	3078.2 (17.9)

Tabelle A.21: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 21

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm	h <sub>10</sub> [mm] r = 770 mm
0.23 (6.8·10 <sup>-4</sup> )	834.4 (9.6·10 <sup>-2</sup> )	837.3 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	841.6 (7.4·10 <sup>-1</sup> )	937.2 (10.7)	976.4 (1.9)	1058.5 (2.2)	1113.8 (0.5)
0.40 (1.2·10 <sup>-3</sup> )	834.8 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	839.7 (1.7·10 <sup>-1</sup> )	846.8 (1.3)	1012.5 (11.4)	1071.6 (3.2)	1209.3 (3.6)	1302.2 (0.8)
0.65 (2.3·10 <sup>-3</sup> )	836.1 (2.0·10 <sup>-1</sup> )	844.4 (3.0·10 <sup>-1</sup> )	856.5 (1.9)	1132.4 (12.8)	1221.8 (5.2)	1444.1 (5.9)	1593.2 (1.2)
0.97 (4.3·10 <sup>-3</sup> )	837.2 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	848.9 (4.2·10 <sup>-1</sup> )	865.9 (2.8)	1256.5 (13.9)	1376.8 (6.8)	1690.8 (8.3)	1903.7 (1.9)
1.21 (5.0·10 <sup>-3</sup> )	838.8 (6.4·10 <sup>-2</sup> )	853.5 (4.9·10 <sup>-1</sup> )	874.5 (3.5)	1356.6 (15.4)	1502.9 (8.3)	1889.0 (10.2)	2151.0 (2.1)
1.63 (6.4·10 <sup>-3</sup> )	840.4 (7.6·10 <sup>-2</sup> )	860.6 (7.6·10 <sup>-1</sup> )	888.0 (4.7)	1521.9 (17.7)	1704.1 (11.6)	2206.1 (14.4)	2549.6 (2.0)
1.97 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	841.6 (7.9·10 <sup>-2</sup> )	866.3 (9.5·10 <sup>-1</sup> )	899.5 (5.2)	1650.3 (18.9)	1864.7 (13.1)	2457.2 (16.2)	2863.8 (1.6)
2.19 (9.8·10 <sup>-3</sup> )	842.3 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	869.7 (9.8·10 <sup>-1</sup> )	904.9 (5.8)	1734.1 (20.2)	1968.9 (14.8)	2621.1 (17.7)	3069.5 (1.0)
2.82 (2.1·10 <sup>-2</sup> )	845.4 (8.8·10 <sup>-2</sup> )	882.2 (1.3)	928.0 (7.5)	1988.8 (23.4)	2285.2 (18.7)	3115.4 (21.9)	3688.2 (1.9)

Tabelle A.22: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 22

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm
0.61 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	832.1 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	833.6 (9.3·10 <sup>-2</sup> )
1.32 (6.5·10 <sup>-3</sup> )	835.1 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	838.7 (1.7·10 <sup>-1</sup> )
1.94 (1.5·10 <sup>-2</sup> )	837.3 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	843.2 (2.5·10 <sup>-1</sup> )
2.65 (1.8·10 <sup>-2</sup> )	840.1 (4.5·10 <sup>-2</sup> )	848.8 (3.9·10 <sup>-1</sup> )
3.46 (4.6·10 <sup>-2</sup> )	843.1 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	855.9 (5.9·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.23: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 23

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm	h <sub>10</sub> [mm] r = 770 mm
0.40 (9.3·10 <sup>-4</sup> )	835.0 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	837.0 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	838.8 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	842.0 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	877.5 (1.9)	1002.7 (8.7)	1105.3 (0.6)
0.68 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	836.3 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	839.8 (1.9·10 <sup>-1</sup> )	842.8 (1.9·10 <sup>-1</sup> )	848.3 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	905.7 (6.2)	1122.2 (8.9)	1290.3 (0.8)
1.13 (3.0·10 <sup>-3</sup> )	838.3 (8.5·10 <sup>-2</sup> )	844.1 (2.5·10 <sup>-1</sup> )	848.9 (2.4·10 <sup>-1</sup> )	857.7 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	951.6 (4.8)	1292.1 (8.8)	1554.5 (1.3)
1.72 (7.2·10 <sup>-3</sup> )	840.5 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	849.7 (4.1·10 <sup>-1</sup> )	857.0 (3.7·10 <sup>-1</sup> )	870.4 (2.3·10 <sup>-1</sup> )	1009.7 (7.4)	1515.7 (8.8)	1900.7 (1.8)
2.15 (9.7·10 <sup>-3</sup> )	842.4 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	854.4 (5.0·10 <sup>-1</sup> )	863.5 (4.3·10 <sup>-1</sup> )	880.4 (2.6·10 <sup>-1</sup> )	1052.7 (8.8)	1678.7 (8.4)	2151.4 (1.9)
2.84 (2.6·10 <sup>-2</sup> )	845.4 (8.1·10 <sup>-2</sup> )	862.4 (7.0·10 <sup>-1</sup> )	874.6 (5.7·10 <sup>-1</sup> )	896.9 (3.4·10 <sup>-1</sup> )	1121.4 (11.4)	1936.4 (8.1)	2548.4 (1.4)
3.38 (3.7·10 <sup>-2</sup> )	847.5 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	868.8 (8.6·10 <sup>-1</sup> )	883.5 (6.9·10 <sup>-1</sup> )	910.4 (4.2·10 <sup>-1</sup> )	1176.2 (13.2)	2142.5 (7.2)	2865.2 (1.6)

Tabelle A.24: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 24

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm	h <sub>10</sub> [mm] r = 770 mm
0.40 (9.8·10 <sup>-4</sup> )	834.5 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	836.5 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	838.3 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	841.5 (0.2)	882.8 (0.3)	1028.7 (1.6)	1137.0 (1.9)
0.41 (9.9·10 <sup>-4</sup> )	834.2 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	836.1 (9.9·10 <sup>-2</sup> )	837.8 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	840.9 (0.2)	881.9 (0.2)	1027.4 (1.6)	1135.9 (2.6)
0.67 (2.1·10 <sup>-3</sup> )	836.0 (9.4·10 <sup>-2</sup> )	839.3 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	842.3 (1.8·10 <sup>-1</sup> )	847.5 (0.3)	915.3 (0.3)	1155.7 (2.5)	1334.7 (3.3)
0.69 (2.5·10 <sup>-3</sup> )	835.7 (9.3·10 <sup>-2</sup> )	838.9 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	841.8 (2.0·10 <sup>-1</sup> )	846.8 (0.3)	913.9 (0.3)	1152.1 (2.6)	1329.8 (4.2)
0.69 (2.8·10 <sup>-3</sup> )	835.4 (8.4·10 <sup>-2</sup> )	838.6 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	841.4 (2.0·10 <sup>-1</sup> )	846.4 (0.4)	913.6 (0.3)	1152.2 (2.6)	1330.4 (4.2)
1.14 (4.2·10 <sup>-3</sup> )	838.1 (5.2·10 <sup>-2</sup> )	843.7 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	848.7 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	857.1 (0.5)	967.4 (0.3)	1358.4 (4.2)	1650.1 (5.8)
1.16 (5.2·10 <sup>-3</sup> )	837.9 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	843.3 (1.8·10 <sup>-1</sup> )	848.1 (3.2·10 <sup>-1</sup> )	856.3 (0.6)	965.7 (0.5)	1354.1 (4.1)	1643.7 (6.9)
1.16 (6.1·10 <sup>-3</sup> )	837.2 (2.1·10 <sup>-1</sup> )	842.6 (2.4·10 <sup>-1</sup> )	847.3 (3.8·10 <sup>-1</sup> )	855.5 (0.7)	964.6 (0.6)	1351.9 (4.3)	1641.1 (6.9)
1.74 (7.4·10 <sup>-3</sup> )	840.2 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	849.0 (2.3·10 <sup>-1</sup> )	856.5 (4.6·10 <sup>-1</sup> )	869.1 (0.9)	1032.1 (0.6)	1610.6 (6.1)	2041.0 (8.7)
1.76 (8.5·10 <sup>-3</sup> )	840.2 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	848.9 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	856.2 (5.1·10 <sup>-1</sup> )	868.6 (1.0)	1031.3 (0.7)	1608.8 (6.1)	2038.8 (10.3)
1.76 (9.7·10 <sup>-3</sup> )	839.1 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	847.7 (2.9·10 <sup>-1</sup> )	855.0 (5.3·10 <sup>-1</sup> )	867.3 (1.0)	1029.1 (0.9)	1603.7 (6.4)	2032.3 (10.3)
2.18 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	841.9 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	853.3 (3.1·10 <sup>-1</sup> )	862.6 (6.0·10 <sup>-1</sup> )	878.4 (1.2)	1079.6 (0.8)	1793.8 (7.7)	2324.7 (11.0)
2.20 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	841.5 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	852.7 (3.8·10 <sup>-1</sup> )	861.8 (6.5·10 <sup>-1</sup> )	877.2 (1.3)	1077.4 (1.0)	1788.0 (7.9)	2317.8 (12.5)
2.21 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	841.9 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	853.3 (3.5·10 <sup>-1</sup> )	862.5 (6.4·10 <sup>-1</sup> )	878.1 (1.3)	1079.3 (0.9)	1793.2 (7.5)	2324.1 (12.6)
2.81 (2.4·10 <sup>-2</sup> )	843.8 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	859.2 (4.7·10 <sup>-1</sup> )	871.2 (8.5·10 <sup>-1</sup> )	891.5 (1.7)	1144.9 (1.3)	2044.7 (9.3)	2711.7 (14.6)
2.82 (2.0·10 <sup>-2</sup> )	844.3 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	859.7 (4.6·10 <sup>-1</sup> )	871.7 (8.6·10 <sup>-1</sup> )	891.8 (1.7)	1145.8 (1.3)	2046.6 (9.8)	2715.5 (15.7)
2.82 (2.2·10 <sup>-2</sup> )	844.0 (8.9·10 <sup>-2</sup> )	859.2 (5.1·10 <sup>-1</sup> )	871.1 (8.7·10 <sup>-1</sup> )	890.9 (1.7)	1143.7 (1.3)	2040.4 (10.3)	2709.4 (15.8)
3.36 (3.9·10 <sup>-2</sup> )	846.2 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	865.3 (6.4·10 <sup>-1</sup> )	879.7 (1.1)	903.6 (2.2)	1202.8 (1.8)	2264.1 (11.9)	3055.5 (18.9)
3.38 (4.7·10 <sup>-2</sup> )	846.2 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	865.8 (5.9·10 <sup>-1</sup> )	880.7 (1.1)	905.5 (2.2)	1210.8 (1.7)	2293.5 (11.0)	3095.5 (18.6)

Tabelle A.25: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 25

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm
0.23 (1.2·10 <sup>-3</sup> )	834.0 (9.6·10 <sup>-2</sup> )	836.0 (9.2·10 <sup>-2</sup> )	837.2 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	840.9 (0.2)	928.5 (13.1)	970.0 (3.7)	1045.7 (1.0)
0.35 (1.5·10 <sup>-3</sup> )	835.0 (4.9·10 <sup>-2</sup> )	837.9 (5.5·10 <sup>-2</sup> )	839.6 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	845.3 (0.2)	984.3 (14.8)	1040.7 (5.2)	1154.8 (1.5)
0.74 (2.0·10 <sup>-3</sup> )	836.4 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	842.6 (7.6·10 <sup>-2</sup> )	846.2 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	857.8 (0.4)	1153.8 (19.2)	1255.3 (7.0)	1484.4 (3.0)
1.26 (4.4·10 <sup>-2</sup> )	838.8 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	849.6 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	855.6 (2.0·10 <sup>-1</sup> )	875.1 (0.6)	1375.2 (23.5)	1531.7 (10.9)	1909.6 (5.1)
1.95 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	841.5 (6.4·10 <sup>-2</sup> )	858.7 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	868.1 (3.1·10 <sup>-1</sup> )	897.8 (0.8)	1652.6 (27.6)	1875.6 (15.7)	2439.2 (7.4)
2.57 (1.5·10 <sup>-2</sup> )	844.3 (8.4·10 <sup>-2</sup> )	867.9 (2.1·10 <sup>-1</sup> )	880.5 (4.0·10 <sup>-1</sup> )	919.2 (0.8)	1899.4 (30.9)	2180.0 (19.4)	2906.6 (9.5)
3.26 (2.7·10 <sup>-2</sup> )	846.6 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	877.6 (2.6·10 <sup>-1</sup> )	893.9 (5.1·10 <sup>-1</sup> )	942.9 (1.1)	2176.5 (26.5)	2510.9 (24.4)	3413.9 (12.0)

Tabelle A.26: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 26

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.60 (3.0·10 <sup>-3</sup> )	830.8 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	831.4 (9.7·10 <sup>-2</sup> )
1.33 (5.3·10 <sup>-3</sup> )	833.8 (5.6·10 <sup>-2</sup> )	835.1 (1.0·10 <sup>-1</sup> )
2.01 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	836.3 (5.2·10 <sup>-2</sup> )	838.5 (1.7·10 <sup>-1</sup> )
2.63 (1.8·10 <sup>-2</sup> )	838.8 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	841.9 (3.1·10 <sup>-1</sup> )
3.32 (4.0·10 <sup>-2</sup> )	841.6 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	846.2 (4.6·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.27: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 27

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.49 (4.2·10 <sup>-3</sup> )	827.5 (9.2·10 <sup>-2</sup> )	833.3 (0.5)	839.5 (2.3)	1102.8 (1.8)
0.99 (4.2·10 <sup>-3</sup> )	830.6 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	842.7 (1.0)	855.3 (4.5)	1381.7 (1.5)
1.49 (6.3·10 <sup>-3</sup> )	832.5 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	851.4 (1.6)	874.0 (8.4)	1645.5 (2.4)
1.98 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	834.7 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	860.7 (2.2)	890.6 (9.8)	1903.1 (3.2)
3.17 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	839.6 (1.8·10 <sup>-1</sup> )	886.9 (4.2)	933.5 (14.6)	2522.3 (29.4)

Tabelle A.28: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 28

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.32 (9.2·10 <sup>-4</sup> )	831.5 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	834.0 (9.3·10 <sup>-2</sup> )	837.8 (0.9)	1011.4 (1.1)
0.49 (1.6·10 <sup>-3</sup> )	832.1 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	836.0 (0.1)	841.8 (1.2)	1106.5 (1.7)
1.01 (3.3·10 <sup>-3</sup> )	834.7 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	843.0 (0.2)	855.0 (2.4)	1378.6 (3.3)
1.69 (7.3·10 <sup>-3</sup> )	837.1 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	851.9 (0.3)	872.8 (5.1)	1725.4 (6.1)
2.48 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	840.9 (8.6·10 <sup>-2</sup> )	864.4 (0.4)	894.8 (8.1)	2129.2 (8.6)
3.25 (4.0·10 <sup>-2</sup> )	844.6 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	877.8 (0.6)	920.8 (9.1)	2515.6 (14.8)

Tabelle A.29: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 29

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm
0.45 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	831.0 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	832.2 (7.4·10 <sup>-2</sup> )
1.14 (4.8·10 <sup>-3</sup> )	834.0 (5.7·10 <sup>-2</sup> )	838.2 (6.3·10 <sup>-2</sup> )
1.72 (9.3·10 <sup>-3</sup> )	836.0 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	844.5 (1.5·10 <sup>-1</sup> )
2.34 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	838.4 (8.5·10 <sup>-2</sup> )	852.2 (2.0·10 <sup>-1</sup> )
2.96 (3.8·10 <sup>-2</sup> )	841.4 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	862.1 (2.8·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.30: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 30

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.30 (1.2·10 <sup>-3</sup> )	833.1 (0.1)	836.6 (2.0)	837.0 (0.2)	842.6 (0.6)	880.6 (5.7)	971.1 (1.7)	1015.9 (6.7)
0.46 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	833.9 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	837.6 (0.8)	840.0 (0.4)	848.4 (0.7)	906.7 (8.5)	1042.0 (2.7)	1109.9 (10.4)
0.96 (3.6·10 <sup>-3</sup> )	835.4 (8.1·10 <sup>-2</sup> )	842.5 (1.9)	848.8 (1.1)	866.4 (1.8)	984.3 (10.4)	1247.8 (5.5)	1381.2 (20.1)
1.60 (7.0·10 <sup>-3</sup> )	837.8 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	856.3 (3.9)	862.5 (2.3)	893.8 (3.5)	1093.9 (8.6)	1517.9 (8.9)	1733.7 (31.8)
2.38 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	841.3 (0.1)	870.9 (4.3)	882.2 (4.4)	924.8 (5.5)	1216.6 (13.7)	1835.5 (13.1)	2147.0 (43.2)
3.12 (3.3·10 <sup>-2</sup> )	844.6 (0.2)	887.6 (5.8)	903.1 (6.6)	962.8 (8.5)	1340.1 (18.4)	2143.5 (16.9)	2545.5 (54.7)

Tabelle A.31: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 31

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.55 (1.6·10 <sup>-3</sup> )	831.7 (6.1·10 <sup>-2</sup> )	832.7 (7.1·10 <sup>-2</sup> )
1.27 (5.5·10 <sup>-3</sup> )	834.7 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	837.5 (1.5·10 <sup>-1</sup> )
1.95 (1.0·10 <sup>-2</sup> )	837.1 (5.5·10 <sup>-2</sup> )	842.0 (1.9·10 <sup>-1</sup> )
3.27 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	842.5 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	853.1 (4.6·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.32: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 32

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.35 (8.2·10 <sup>-4</sup> )	831.8 (5.8·10 <sup>-2</sup> )	836.6 (5.8·10 <sup>-1</sup> )	842.3 (9.4·10 <sup>-1</sup> )	885.3 (1.9)	978.8 (2.2)	1011.8 (6.4·10 <sup>-1</sup> )
0.53 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	832.6 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	839.9 (9.2·10 <sup>-1</sup> )	848.7 (1.4)	913.9 (2.9)	1055.8 (3.3)	1106.0 (9.4·10 <sup>-1</sup> )
1.1 (3.2·10 <sup>-3</sup> )	835.3 (9.9·10 <sup>-2</sup> )	850.7 (1.9)	868.1 (2.8)	996.6 (5.4)	1276.4 (6.3)	1376.1 (1.7)
1.84 (8.7·10 <sup>-3</sup> )	838.3 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	865.3 (3.4)	894.0 (4.7)	1101.6 (8.3)	1555.1 (9.7)	1716.9 (2.3)
2.73 (1.9·10 <sup>-2</sup> )	841.8 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	884.6 (5.4)	926.8 (7.3)	1226.9 (11.4)	1883.0 (13.4)	2117.8 (3.3)
3.56 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	845.1 (1.4·10 <sup>-1</sup> )	904.8 (7.5)	959.8 (10.4)	1348.2 (14.1)	2195.7 (17.1)	2499.4 (3.8)

Tabelle A.33: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 33

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.32 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	832.9 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	835.5 (1.5·10 <sup>-1</sup> )	841.0 (4.5·10 <sup>-1</sup> )	879.8 (7.4)	971.7 (7.3)	1012.5 (5.7·10 <sup>-1</sup> )
0.49 (1.8·10 <sup>-3</sup> )	833.4 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	837.5 (2.3·10 <sup>-1</sup> )	845.8 (7.2·10 <sup>-1</sup> )	907.1 (7.1)	1046.7 (7.8)	1105.5 (8.1·10 <sup>-1</sup> )
1.02 (4.1·10 <sup>-3</sup> )	835.6 (9.5·10 <sup>-2</sup> )	844.8 (5.3·10 <sup>-1</sup> )	861.5 (1.6)	986.3 (7.9)	1263.1 (8.8)	1375.3 (1.6)
1.72 (7.1·10 <sup>-3</sup> )	838.6 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	855.6 (1.1)	884.2 (2.9)	1088.5 (8.9)	1538.4 (12.3)	1719.3 (2.5)
2.55 (1.7·10 <sup>-2</sup> )	842.2 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	870.3 (1.9)	913.8 (4.4)	1208.2 (12.8)	1865.3 (11.0)	2121.3 (4.2)
3.33 (3.5·10 <sup>-2</sup> )	845.6 (9.1·10 <sup>-2</sup> )	888.2 (3.5)	944.6 (6.4)	1328.9 (8.7)	2174.4 (7.4)	2499.4 (6.5)

Tabelle A.34: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 34

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.59 (2.4·10 <sup>-3</sup> )	831.8 (4.9·10 <sup>-2</sup> )	832.1 (5.9·10 <sup>-2</sup> )
1.31 (5.2·10 <sup>-3</sup> )	834.7 (5.1·10 <sup>-2</sup> )	835.6 (1.3·10 <sup>-1</sup> )
1.97 (7.4·10 <sup>-3</sup> )	837.2 (5.1·10 <sup>-2</sup> )	838.7 (1.8·10 <sup>-1</sup> )
2.57 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	839.4 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	841.7 (3.0·10 <sup>-1</sup> )
3.31 (4.7·10 <sup>-2</sup> )	842.6 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	846.0 (3.6·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.35: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 35

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.33 (9.2·10 <sup>-4</sup> )	832.2 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	836.5 (4.2·10 <sup>-1</sup> )	841.9 (3.6·10 <sup>-1</sup> )	886.2 (1.2)	977.2 (1.6)	1012.3 (1.4)
0.51 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	832.7 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	839.4 (6.2·10 <sup>-1</sup> )	847.6 (6.4·10 <sup>-1</sup> )	914.3 (1.8)	1052.0 (2.4)	1105.3 (2.1)
1.06 (5.0·10 <sup>-3</sup> )	835.0 (2.2·10 <sup>-1</sup> )	848.8 (1.3)	865.3 (1.4)	996.9 (3.6)	1269.3 (4.5)	1375.3 (4.1)
1.78 (7.7·10 <sup>-3</sup> )	837.4 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	861.3 (2.2)	889.3 (2.2)	1102.5 (5.9)	1547.1 (6.9)	1719.8 (6.3)
2.65 (2.1·10 <sup>-2</sup> )	841.4 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	879.1 (3.2)	920.9 (3.1)	1230.8 (9.3)	1878.0 (9.6)	21300. (8.4)
3.47 (4.1·10 <sup>-2</sup> )	844.5 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	896.8 (4.6)	950.2 (2.8)	1353.4 (11.8)	2191.1 (13.3)	2517.7 (10.6)

Tabelle A.36: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 36

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.31 (1.0·10 <sup>-3</sup> )	832.9 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	835.2 (9.5·10 <sup>-2</sup> )	840.8 (6.9·10 <sup>-1</sup> )	880.9 (1.4)	974.3 (1.6)	1010.4 (7.0·10 <sup>-1</sup> )
0.47 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	833.1 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	836.6 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	845.0 (1.1)	905.3 (2.2)	1046.0 (2.5)	1101.0 (1.0)
0.98 (2.5·10 <sup>-3</sup> )	835.2 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	842.8 (3.6·10 <sup>-1</sup> )	859.9 (2.3)	980.1 (4.1)	1261.9 (4.8)	1372.0 (2.0)
1.66 (6.3·10 <sup>-3</sup> )	837.9 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	851.9 (9.6·10 <sup>-1</sup> )	879.9 (4.5)	1076.3 (5.7)	1537.4 (7.8)	1717.1 (3.2)
2.48 (1.5·10 <sup>-2</sup> )	841.7 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	865.0 (1.8)	907.9 (7.6)	1193.7 (6.3)	1868.5 (11.3)	2129.3 (4.0)
3.25 (4.1·10 <sup>-2</sup> )	845.1 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	879.2 (1.6)	934.9 (8.0)	1303.4 (7.0)	2176.2 (15.0)	2512.7 (6.0)

Tabelle A.37: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 37

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.30 (9.0·10 <sup>-4</sup> )	832.6 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	836.8 (0.2)	840.4 (0.3)	1015.9 (0.6)
0.45 (1.2·10 <sup>-3</sup> )	833.3 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	839.6 (0.2)	844.9 (0.5)	1107.2 (1.0)
0.92 (2.9·10 <sup>-3</sup> )	835.6 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	848.6 (0.5)	859.2 (1.0)	1381.6 (1.9)
1.55 (6.8·10 <sup>-3</sup> )	838.3 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	860.7 (0.8)	877.8 (1.2)	1726.6 (2.7)
2.31 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	841.8 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	876.5 (1.3)	902.6 (0.9)	2132.0 (3.7)
3.01 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	845.1 (8.9·10 <sup>-2</sup> )	892.4 (1.7)	926.7 (1.0)	2507.9 (5.2)

Tabelle A.38: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 38

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm
0.28 (2.2·10 <sup>-3</sup> )	829.1 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	829.6 (8.2·10 <sup>-2</sup> )
1.23 (5.3·10 <sup>-3</sup> )	833.4 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	834.9 (1.2·10 <sup>-1</sup> )
1.86 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	835.6 (1.8·10 <sup>-1</sup> )	837.7 (2.3·10 <sup>-1</sup> )
2.42 (1.8·10 <sup>-2</sup> )	836.8 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	839.2 (2.8·10 <sup>-1</sup> )
3.17 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	840.3 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	843.0 (3.5·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.39: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 39

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm	h <sub>10</sub> [mm] r = 770 mm
0.44 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	834.1 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	837.3 (0.1)	840.0 (0.1)	844.9 (0.3)	877.8 (2.6)	1004.1 (2.0)	1099.9 (0.3)
0.76 (2.0·10 <sup>-3</sup> )	835.6 (7.9·10 <sup>-2</sup> )	840.9 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	845.6 (0.1)	853.8 (0.5)	910.1 (2.8)	1120.3 (2.6)	1279.6 (0.6)
1.23 (4.4·10 <sup>-3</sup> )	837.6 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	846.2 (0.1)	853.7 (0.2)	867.0 (0.8)	956.3 (4.0)	1288.5 (3.3)	1539.9 (0.9)
1.84 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	840.4 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	853.5 (0.2)	864.9 (0.3)	884.9 (1.1)	1017.6 (5.1)	1503.4 (4.4)	1871.6 (1.2)
2.30 (1.0·10 <sup>-2</sup> )	842.3 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	858.8 (0.2)	873.1 (0.3)	898.1 (1.3)	1062.9 (6.1)	1657.9 (4.3)	2108.3 (1.4)
3.02 (3.6·10 <sup>-2</sup> )	845.3 (8.6·10 <sup>-2</sup> )	867.4 (0.3)	886.6 (0.4)	920.0 (1.7)	1135.1 (7.6)	1906.5 (5.5)	2490.2 (2.1)
3.43 (3.9·10 <sup>-2</sup> )	847.0 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	872.6 (0.4)	894.7 (0.4)	933.1 (1.9)	1178.2 (8.9)	2053.3 (5.8)	2714.7 (2.6)

Tabelle A.40: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 40

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.42 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	828.3 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	857.8 (1.5)	863.9 (1.7)	1101.5 (5.2)
0.88 (3.5·10 <sup>-3</sup> )	830.5 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	889.9 (3.1)	901.9 (3.3)	1382.0 (1.8)
1.32 (6.1·10 <sup>-3</sup> )	832.1 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	921.1 (4.6)	938.8 (4.8)	1649.9 (7.2)
1.76 (8.0·10 <sup>-3</sup> )	834.1 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	953.2 (6.2)	976.6 (6.3)	1911.1 (8.3)
2.89 (2.3·10 <sup>-2</sup> )	838.4 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	1039.1 (10.4)	1077.8 (10.6)	2565.9 (14.0)

Tabelle A.41: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 41

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.31 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	831.5 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	837.1 (0.4)	841.4 (0.9)	1013.9 (2.3)
0.48 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	831.5 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	840.1 (0.6)	846.6 (1.3)	1105.6 (3.2)
0.98 (3.2·10 <sup>-3</sup> )	834.0 (7.6·10 <sup>-2</sup> )	851.3 (1.3)	864.5 (2.5)	1377.6 (5.8)
1.66 (6.3·10 <sup>-3</sup> )	836.8 (9.5·10 <sup>-2</sup> )	866.3 (2.2)	888.8 (3.3)	1724.3 (8.8)
2.47 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	840.6 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	886.0 (3.6)	919.8 (5.1)	2127.9 (12.3)
3.22 (4.4·10 <sup>-2</sup> )	844.2 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	905.8 (4.9)	950.7 (7.1)	2511.4 (16.0)

Tabelle A.42: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 42

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.46 (2.8·10 <sup>-3</sup> )	828.1 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	835.3 (0.4)	840.5 (1.7)	1107.3 (1.1)
0.97 (4.9·10 <sup>-3</sup> )	830.6 (5.5·10 <sup>-2</sup> )	845.3 (0.8)	855.7 (3.3)	1384.4 (2.0)
1.46 (6.6·10 <sup>-3</sup> )	832.3 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	854.9 (1.2)	870.4 (5.0)	1649.1 (2.9)
1.93 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	834.4 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	865.1 (1.6)	885.5 (6.5)	1907.1 (4.1)
2.41 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	836.4 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	875.4 (2.0)	900.8 (8.2)	2152.0 (6.9)
2.84 (2.5·10 <sup>-2</sup> )	838.7 (8.6·10 <sup>-2</sup> )	886.3 (2.4)	916.3 (9.7)	2394.2 (9.4)
3.13 (3.5·10 <sup>-2</sup> )	839.5 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	893.1 (2.7)	926.4 (10.9)	2549.5 (11.9)

Tabelle A.43: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 43

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.44 (5.1·10 <sup>-3</sup> )	830.3 (8.6·10 <sup>-2</sup> )	830.5 (0.1)
1.12 (4.6·10 <sup>-3</sup> )	833.1 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	833.2 (0.1)
1.81 (9.4·10 <sup>-3</sup> )	835.7 (5.2·10 <sup>-2</sup> )	835.7 (0.2)
2.47 (1.7·10 <sup>-2</sup> )	838.2 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	838.0 (0.2)
3.12 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	840.7 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	840.3 (0.3)

Tabelle A.44: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 44

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.46 (2.0·10 <sup>-3</sup> )	827.5 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	833.4 (0.3)	839.0 (1.0)	1107.9 (0.6)
0.92 (3.6·10 <sup>-3</sup> )	829.8 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	841.9 (0.7)	852.9 (1.9)	1385.0 (1.2)
1.39 (6.3·10 <sup>-3</sup> )	831.3 (1.8·10 <sup>-1</sup> )	849.9 (1.0)	866.3 (2.5)	1654.2 (2.5)
1.85 (1.0·10 <sup>-2</sup> )	833.0 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	858.5 (1.4)	881.1 (3.2)	1918.3 (3.3)
2.30 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	834.9 (5.7·10 <sup>-2</sup> )	867.0 (1.8)	895.2 (3.5)	2166.5 (5.1)
3.01 (3.1·10 <sup>-2</sup> )	838.1 (8.3·10 <sup>-2</sup> )	881.9 (2.5)	919.2 (4.4)	2569.1 (5.9)

Tabelle A.45: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 45

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm
0.20 (9.6·10 <sup>-4</sup> )	832.5 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	834.5 (0.1)	835.5 (0.3)	839.2 (0.2)	951.0 (5.0)	1020.8 (0.3)
0.30 (9.3·10 <sup>-4</sup> )	832.9 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	835.9 (0.2)	837.3 (0.4)	842.9 (0.2)	1012.3 (5.1)	1115.4 (0.5)
0.51 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	834.1 (9.6·10 <sup>-2</sup> )	839.1 (0.4)	841.6 (0.7)	851.0 (0.4)	1138.7 (5.6)	1310.3 (0.8)
0.62 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	834.1 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	840.1 (0.4)	843.1 (0.9)	854.5 (0.6)	1197.4 (6.0)	1402.5 (0.9)
0.96 (2.9·10 <sup>-3</sup> )	836.1 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	845.3 (0.7)	850.0 (1.3)	867.1 (0.9)	1384.0 (7.4)	1691.6 (1.4)
1.31 (5.0·10 <sup>-3</sup> )	837.2 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	849.9 (0.9)	856.2 (1.8)	878.9 (1.3)	1565.5 (7.6)	1971.4 (1.8)
1.66 (6.3·10 <sup>-3</sup> )	838.6 (1.9·10 <sup>-1</sup> )	854.9 (1.1)	863.0 (2.2)	891.5 (1.6)	1741.1 (10.1)	2244.3 (2.2)
2.25 (1.5·10 <sup>-2</sup> )	840.5 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	863.0 (1.5)	874.0 (3.0)	911.9 (2.6)	2032.9 (12.3)	2695.0 (3.0)
2.80 (1.9·10 <sup>-2</sup> )	843.3 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	872.2 (2.0)	886.2 (3.8)	933.5 (3.3)	2314.6 (14.7)	3128.4 (3.7)
3.35 (2.5·10 <sup>-2</sup> )	846.0 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	881.7 (2.4)	898.9 (4.8)	955.2 (4.1)	2590.4 (17.3)	3553.5 (5.7)

Tabelle A.46: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 46

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm	h <sub>10</sub> [mm] r = 770 mm
0.21 (1.0·10 <sup>-3</sup> )	834.2 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	837.2 (0.2)	842.1 (1.1)	936.4 (12.7)	977.0 (0.4)	1057.1 (2.7)	1115.3 (0.7)
0.43 (9.9·10 <sup>-4</sup> )	835.7 (9.2·10 <sup>-2</sup> )	841.7 (0.3)	851.6 (2.1)	1054.4 (12.1)	1126.3 (0.7)	1292.1 (2.5)	1408.2 (1.3)
0.59 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	836.6 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	844.8 (0.4)	858.1 (2.8)	1134.3 (14.7)	1225.6 (1.3)	1448.1 (3.5)	1604.0 (1.7)
0.75 (2.5·10 <sup>-3</sup> )	837.3 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	847.6 (0.4)	864.1 (3.5)	1215.4 (7.2)	1320.7 (1.2)	1602.2 (6.1)	1790.0 (2.4)
1.17 (4.8·10 <sup>-3</sup> )	839.1 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	855.1 (0.6)	880.0 (5.0)	1401.9 (13.4)	1557.5 (1.7)	1972.7 (6.6)	2256.3 (3.9)
2.01 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	842.6 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	871.0 (1.0)	912.1 (8.1)	1787.1 (6.9)	2026.7 (2.5)	2707.9 (11.5)	3175.2 (6.3)
2.82 (2.5·10 <sup>-2</sup> )	846.6 (8.5·10 <sup>-2</sup> )	888.4 (1.3)	942.6 (12.4)	2154.6 (5.6)	2487.1 (3.3)	3426.9 (16.0)	4075.5 (7.6)

Tabelle A.47: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 47

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.29 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	826.4 (6.4·10 <sup>-2</sup> )	830.4 (0.3)	834.3 (1.6)	1007.8 (0.1)
0.78 (3.6·10 <sup>-3</sup> )	828.7 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	838.9 (0.5)	848.7 (4.2)	1286.3 (0.7)
1.58 (6.6·10 <sup>-3</sup> )	831.9 (5.6·10 <sup>-2</sup> )	853.1 (1.2)	873.0 (8.4)	1726.3 (1.2)
2.35 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	835.2 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	868.1 (2.0)	897.9 (12.7)	2140.3 (1.9)
3.08 (3.3·10 <sup>-2</sup> )	838.8 (8.3·10 <sup>-2</sup> )	883.6 (2.9)	924.1 (16.8)	2539.0 (4.0)

Tabelle A.48: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 48

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.32 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	831.2 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	835.6 (0.2)	838.7 (0.4)	1011.4 (0.4)
0.49 (2.2·10 <sup>-3</sup> )	832.1 (8.3·10 <sup>-2</sup> )	838.9 (0.3)	843.6 (0.7)	1106.6 (0.6)
1.00 (3.8·10 <sup>-3</sup> )	834.6 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	848.3 (0.6)	858.0 (1.6)	1376.7 (1.3)
1.66 (6.7·10 <sup>-3</sup> )	836.7 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	860.1 (1.0)	876.8 (2.2)	1721.5 (2.6)
2.45 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	840.6 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	876.5 (1.5)	901.7 (3.1)	2132.6 (4.5)
3.20 (4.1·10 <sup>-2</sup> )	843.9 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	892.9 (2.1)	926.7 (3.8)	2515.2 (6.9)

Tabelle A.49: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 49

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.32 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	832.2 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	834.4 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	835.4 (0.1)	841.7 (0.4)	885.7 (0.9)	1013.5 (0.7)
0.48 (1.5·10 <sup>-3</sup> )	832.9 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	836.3 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	837.9 (0.2)	847.4 (0.5)	913.9 (1.4)	1107.6 (1.1)
1.00 (3.4·10 <sup>-3</sup> )	835.2 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	842.1 (0.1)	845.4 (0.3)	864.6 (0.7)	997.9 (2.4)	1380.4 (2.3)
1.69 (5.9·10 <sup>-3</sup> )	837.8 (6.0·10 <sup>-2</sup> )	849.8 (0.2)	855.9 (0.3)	888.6 (1.9)	1108.7 (4.6)	1728.7 (3.7)
2.53 (3.1·10 <sup>-2</sup> )	841.2 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	859.9 (0.4)	869.8 (0.5)	919.5 (3.0)	1242.2 (2.3)	2145.2 (4.5)
3.32 (3.1·10 <sup>-2</sup> )	844.8 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	870.5 (0.5)	884.6 (0.7)	949.2 (3.0)	1368.2 (4.2)	2539.6 (5.7)

Tabelle A.50: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 50

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.59 (3.1·10 <sup>-3</sup> )	829.0 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	829.1 (6.7·10 <sup>-2</sup> )
1.44 (8.8·10 <sup>-3</sup> )	831.6 (2.7·10 <sup>-1</sup> )	831.6 (2.9·10 <sup>-1</sup> )
2.05 (1.4·10 <sup>-2</sup> )	834.8 (4.3·10 <sup>-2</sup> )	834.7 (1.1·10 <sup>-1</sup> )
2.75 (2.2·10 <sup>-2</sup> )	837.5 (8.7·10 <sup>-2</sup> )	837.2 (1.7·10 <sup>-1</sup> )
3.37 (4.5·10 <sup>-2</sup> )	840.1 (9.2·10 <sup>-2</sup> )	839.6 (2.9·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.51: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 51

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.49 (2.6·10 <sup>-3</sup> )	829.3 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	858.5 (1.1)	866.2 (0.5)	1103.4 (0.8)
1.52 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	833.1 (5.5·10 <sup>-1</sup> )	923.0 (3.5)	947.2 (0.9)	1642.1 (2.7)
2.02 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	835.6 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	956.6 (4.6)	988.8 (1.0)	1904.1 (3.6)
3.24 (3.2·10 <sup>-2</sup> )	841.1 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	1045.9 (7.5)	1098.7 (1.2)	2545.8 (5.8)

Tabelle A.52: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 52

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.49 (2.0·10 <sup>-3</sup> )	827.3 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	835.0 (0.3)	841.6 (2.0)	1103.5 (0.6)
1.01 (2.6·10 <sup>-3</sup> )	829.7 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	845.5 (0.6)	859.3 (4.0)	1382.3 (1.3)
1.52 (6.3·10 <sup>-3</sup> )	831.4 (9.3·10 <sup>-2</sup> )	855.6 (0.9)	876.3 (5.5)	1649.4 (4.0)
2.02 (1.0·10 <sup>-2</sup> )	833.5 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	866.6 (1.1)	894.2 (7.1)	1911.4 (5.4)
3.31 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	839.0 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	896.9 (2.0)	943.0 (10.8)	2561.6 (10.1)

Tabelle A.53: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 53

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.33 (9.9·10 <sup>-4</sup> )	832.1 (5.5·10 <sup>-2</sup> )	835.5 (0.1)	841.3 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	875.2 (8.1)	965.3 (5.4)	1009.9 (0.5)
0.52 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	832.8 (5.7·10 <sup>-2</sup> )	838.2 (0.2)	847.1 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	901.9 (7.9)	1041.0 (4.9)	1105.2 (0.8)
1.07 (3.0·10 <sup>-3</sup> )	835.3 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	846.7 (0.5)	865.0 (0.2)	980.9 (5.8)	1257.5 (3.4)	1377.2 (1.6)
1.78 (9.1·10 <sup>-3</sup> )	838.2 (4.9·10 <sup>-2</sup> )	858.4 (1.1)	889.3 (0.5)	1079.1 (6.7)	1528.4 (3.2)	1717.3 (2.7)
2.65 (1.7·10 <sup>-2</sup> )	841.9 (7.9·10 <sup>-2</sup> )	873.8 (1.5)	920.1 (0.6)	1198.6 (7.2)	1852.4 (2.9)	2120.0 (4.1)
3.43 (3.5·10 <sup>-2</sup> )	845.8 (8.1·10 <sup>-2</sup> )	890.5 (2.5)	948.8 (3.1)	1314.8 (5.1)	2153.3 (2.8)	2495.4 (5.1)

Tabelle A.54: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 54

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.27 (7.5·10 <sup>-4</sup> )	832.1 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	834.0 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	834.9 (0.2)	841.7 (0.4)	907.2 (2.8)	1050.7 (0.5)	1112.1 (1.0)
0.58 (5.3·10 <sup>-3</sup> )	833.4 (3.1·10 <sup>-1</sup> )	837.1 (0.3)	839.1 (0.5)	853.5 (1.3)	985.1 (5.5)	1273.3 (1.4)	1396.1 (1.7)
1.00 (5.1·10 <sup>-3</sup> )	835.2 (2.6·10 <sup>-1</sup> )	841.8 (0.4)	845.2 (0.8)	869.2 (2.8)	1086.8 (9.0)	1563.2 (2.3)	1765.2 (2.8)
1.51 (7.2·10 <sup>-3</sup> )	838.3 (8.4·10 <sup>-2</sup> )	848.6 (0.4)	853.5 (0.4)	890.5 (3.1)	1215.1 (13.6)	1924.7 (1.8)	2220.9 (4.0)
2.07 (1.6·10 <sup>-2</sup> )	840.7 (1.6·10 <sup>-1</sup> )	855.3 (0.6)	862.0 (0.6)	911.5 (4.4)	1340.9 (18.2)	2277.8 (3.2)	2667.7 (4.5)
2.61 (2.5·10 <sup>-2</sup> )	844.1 (8.1·10 <sup>-2</sup> )	863.0 (0.8)	871.7 (0.9)	932.8 (5.2)	1462.4 (22.7)	2616.1 (4.7)	3096.8 (5.7)
3.06 (4.6·10 <sup>-2</sup> )	846.8 (1.3·10 <sup>-1</sup> )	870.3 (1.0)	881.5 (1.7)	952.8 (7.9)	1579.4 (27.0)	2942.4 (5.3)	3512.0 (8.2)
3.25 (4.8·10 <sup>-2</sup> )	847.5 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	872.8 (1.1)	885.0 (2.3)	961.4 (8.9)	1628.0 (28.4)	3079.3 (4.2)	3688.3 (10.5)

Tabelle A.55: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 55

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.55 (2.4·10 <sup>-3</sup> )	828.6 (4.1·10 <sup>-2</sup> )	828.7 (7.1·10 <sup>-2</sup> )
1.34 (7.2·10 <sup>-3</sup> )	832.4 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	832.8 (1.5·10 <sup>-1</sup> )
2.02 (9.3·10 <sup>-3</sup> )	834.9 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	835.5 (1.6·10 <sup>-1</sup> )
2.71 (2.1·10 <sup>-2</sup> )	837.6 (7.1·10 <sup>-2</sup> )	838.6 (2.7·10 <sup>-1</sup> )
3.39 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	840.3 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	841.7 (3.1·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.56: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 56

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.29 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	831.7 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	832.8 (9.4·10 <sup>-2</sup> )	834.2 (0.2)	839.6 (0.3)	872.7 (20.5)	1013.9 (0.7)
0.45 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	832.3 (4.8·10 <sup>-2</sup> )	834.0 (0.1)	836.1 (0.3)	844.2 (0.4)	911.4 (5.4)	1111.0 (0.9)
0.92 (3.8·10 <sup>-3</sup> )	834.3 (6.3·10 <sup>-2</sup> )	837.6 (0.3)	842.0 (0.5)	858.7 (1.1)	993.3 (7.9)	1388.7 (2.2)
1.55 (5.5·10 <sup>-3</sup> )	836.8 (7.6·10 <sup>-2</sup> )	842.5 (0.5)	850.0 (0.9)	877.7 (2.1)	1100.4 (10.1)	1748.9 (3.3)
2.33 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	839.9 (7.0·10 <sup>-2</sup> )	848.7 (0.7)	860.1 (1.5)	899.7 (2.1)	1235.2 (5.8)	2174.7 (5.0)
3.10 (2.4·10 <sup>-2</sup> )	843.2 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	855.5 (1.1)	871.0 (2.2)	921.4 (2.4)	1370.1 (12.0)	2583.7 (6.3)

Tabelle A.57: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 57

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm	h <sub>9</sub> [mm] r = 625 mm
0.29 (7.8·10 <sup>-4</sup> )	834.3 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	834.6 (0.9)	836.2 (0.1)	841.3 (0.4)	888.7 (0.8)	1041.1 (2.6)	1159.3 (1.4)
0.45 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	835.1 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	835.2 (1.7)	837.8 (0.2)	845.5 (0.7)	915.9 (1.2)	1142.1 (3.9)	1317.8 (2.1)
0.94 (3.9·10 <sup>-3</sup> )	837.3 (8.1·10 <sup>-2</sup> )	838.3 (2.3)	842.9 (0.3)	858.6 (1.3)	997.8 (2.1)	1446.5 (7.7)	1794.5 (4.0)
1.56 (6.4·10 <sup>-3</sup> )	839.9 (7.7·10 <sup>-2</sup> )	842.7 (2.2)	849.4 (0.5)	874.9 (2.1)	1099.9 (3.3)	1825.4 (12.7)	2386.4 (6.2)
2.35 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	843.3 (6.9·10 <sup>-2</sup> )	848.3 (2.3)	857.8 (0.8)	895.4 (2.8)	1224.2 (4.8)	2283.7 (18.9)	3099.9 (8.7)
3.08 (3.7·10 <sup>-2</sup> )	846.7 (7.6·10 <sup>-2</sup> )	853.9 (2.3)	870.3 (1.1)	915.2 (3.5)	1343.4 (10.6)	2705.0 (24.7)	3752.6 (11.2)

Tabelle A.58: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 58

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.64 (3.0·10 <sup>-3</sup> )	830.1 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	830.2 (1.2·10 <sup>-1</sup> )
1.33 (5.0·10 <sup>-3</sup> )	833.0 (6.6·10 <sup>-2</sup> )	833.2 (7.6·10 <sup>-2</sup> )
2.04 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	835.6 (6.7·10 <sup>-2</sup> )	835.6 (1.5·10 <sup>-1</sup> )
2.69 (2.0·10 <sup>-2</sup> )	838.1 (7.5·10 <sup>-2</sup> )	837.9 (1.7·10 <sup>-1</sup> )
3.36 (5.0·10 <sup>-2</sup> )	840.5 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	840.2 (2.8·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.59: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 59

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.32 (1.0·10 <sup>-3</sup> )	833.0 (5.5·10 <sup>-2</sup> )	838.7 (0.3)	842.6 (0.6)	1012.2 (2.0)
0.49 (2.0·10 <sup>-3</sup> )	833.7 (7.8·10 <sup>-2</sup> )	842.2 (0.4)	848.2 (0.9)	1105.2 (3.0)
1.01 (3.5·10 <sup>-3</sup> )	836.2 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	853.8 (0.8)	865.9 (1.7)	1377.6 (5.3)
1.69 (7.4·10 <sup>-3</sup> )	838.9 (8.5·10 <sup>-2</sup> )	868.9 (1.3)	889.2 (2.8)	1718.9 (7.0)
2.50 (1.6·10 <sup>-2</sup> )	842.7 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	889.0 (2.1)	918.8 (4.6)	2121.3 (9.7)
3.25 (4.9·10 <sup>-2</sup> )	846.0 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	909.5 (2.9)	947.9 (5.0)	2498.8 (12.0)

Tabelle A.60: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 60

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.55 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	830.1 (6.4·10 <sup>-2</sup> )	830.2 (6.8·10 <sup>-2</sup> )
1.27 (6.1·10 <sup>-3</sup> )	833.1 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	833.1 (1.1·10 <sup>-1</sup> )
1.96 (1.3·10 <sup>-2</sup> )	835.6 (5.0·10 <sup>-2</sup> )	835.5 (1.0·10 <sup>-1</sup> )
2.59 (2.0·10 <sup>-2</sup> )	838.3 (7.4·10 <sup>-2</sup> )	838.2 (1.9·10 <sup>-1</sup> )
3.22 (4.4·10 <sup>-2</sup> )	841.1 (5.2·10 <sup>-2</sup> )	840.7 (2.7·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.61: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 61

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.33 (1.0·10 <sup>-3</sup> )	832.9 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	839.2 (0.3)	842.7 (0.6)	885.4 (2.1)	979.4 (0.8)	1011.3 (0.6)
0.51 (1.7·10 <sup>-3</sup> )	834.0 (9.0·10 <sup>-2</sup> )	843.7 (0.4)	849.0 (0.9)	914.8 (3.2)	1057.9 (2.8)	1108.8 (0.9)
1.05 (3.1·10 <sup>-3</sup> )	836.5 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	856.4 (0.9)	867.4 (1.9)	995.7 (6.0)	1274.3 (7.9)	1377.0 (0.6)
1.77 (8.7·10 <sup>-3</sup> )	839.2 (6.1·10 <sup>-2</sup> )	873.5 (1.5)	892.2 (3.1)	1099.5 (9.2)	1550.8 (14.0)	1718.7 (2.9)
2.63 (1.7·10 <sup>-2</sup> )	843.0 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	896.1 (2.3)	923.7 (4.9)	1225.0 (12.8)	1881.8 (18.3)	2124.1 (4.0)
3.43 (5.2·10 <sup>-2</sup> )	846.6 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	919.3 (3.2)	955.7 (7.0)	1344.7 (16.2)	2191.6 (22.9)	2502.9 (5.4)

Tabelle A.62: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 62

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.29 (9.0·10 <sup>-4</sup> )	832.8 (7.3·10 <sup>-2</sup> )	835.5 (0.2)	840.6 (0.6)	883.6 (0.8)	979.6 (0.2)	1014.3 (0.6)
0.44 (1.4·10 <sup>-3</sup> )	833.6 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	837.7 (0.3)	845.5 (0.9)	910.8 (1.2)	1056.9 (0.4)	1109.8 (0.9)
0.92 (3.5·10 <sup>-3</sup> )	835.6 (9.7·10 <sup>-2</sup> )	844.1 (0.7)	859.6 (1.7)	988.0 (2.5)	1277.3 (1.1)	1383.3 (1.9)
1.54 (5.7·10 <sup>-3</sup> )	838.4 (7.2·10 <sup>-2</sup> )	853.6 (1.5)	878.8 (2.6)	1088.3 (3.8)	1561.5 (2.)	1734.4 (3.3)
2.30 (1.2·10 <sup>-2</sup> )	841.7 (1.1·10 <sup>-1</sup> )	865.8 (2.6)	902.8 (3.4)	1207.5 (5.1)	1896.2 (3.5)	2147.7 (5.1)
3.03 (2.3·10 <sup>-2</sup> )	844.8 (1.0·10 <sup>-1</sup> )	877.7 (3.3)	927.1 (4.1)	1323.4 (6.4)	2218.2 (4.6)	2544.9 (6.8)

Tabelle A.63: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 63

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>2</sub> [mm] r = 230 mm
0.61 (2.4·10 <sup>-3</sup> )	829.9 (6.8·10 <sup>-2</sup> )	830.2 (7.6·10 <sup>-2</sup> )
1.32 (5.6·10 <sup>-3</sup> )	832.6 (6.5·10 <sup>-2</sup> )	833.3 (1.0·10 <sup>-1</sup> )
1.99 (1.8·10 <sup>-2</sup> )	834.8 (9.3·10 <sup>-2</sup> )	835.8 (1.8·10 <sup>-1</sup> )
2.68 (1.8·10 <sup>-2</sup> )	837.2 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	838.7 (2.4·10 <sup>-1</sup> )
3.31 (4.2·10 <sup>-2</sup> )	839.8 (1.2·10 <sup>-1</sup> )	841.4 (3.4·10 <sup>-1</sup> )

Tabelle A.64: Ergebnisse Versuchskonfiguration Nr. 64

Q [l/s]	h <sub>0</sub> [mm] r = 0 mm	h <sub>4</sub> [mm] r = 270 mm	h <sub>5</sub> [mm] r = 280 mm	h <sub>6</sub> [mm] r = 320 mm	h <sub>7</sub> [mm] r = 425 mm	h <sub>8</sub> [mm] r = 470 mm
0.29 (1.1·10 <sup>-3</sup> )	830.8 (5.4·10 <sup>-2</sup> )	838.3 (8.6·10 <sup>-1</sup> )	843.7 (8.6·10 <sup>-1</sup> )	886.2 (2.4)	974.8 (3.2)	1011.8 (2.1)
0.44 (1.3·10 <sup>-3</sup> )	831.3 (5.9·10 <sup>-2</sup> )	844.6 (1.5)	852.9 (1.3)	915.8 (3.8)	1047.3 (4.9)	1103.4 (2.8)
0.92 (3.8·10 <sup>-3</sup> )	833.5 (6.2·10 <sup>-2</sup> )	862.5 (3.2)	879.1 (2.5)	1004.4 (7.4)	1266.2 (9.7)	1377.7 (5.1)
1.56 (5.5·10 <sup>-3</sup> )	835.9 (5.8·10 <sup>-2</sup> )	889.2 (5.7)	916.3 (4.4)	1121.0 (11.9)	1547.7 (15.7)	1729.9 (7.4)
2.32 (1.1·10 <sup>-2</sup> )	839.2 (8.0·10 <sup>-2</sup> )	926.7 (9.3)	966.3 (6.9)	1265.1 (16.7)	1886.7 (22.6)	2151.8 (10.1)
3.04 (3.2·10 <sup>-2</sup> )	842.8 (8.2·10 <sup>-2</sup> )	968.5 (13.0)	1019.8 (9.7)	1409.0 (19.2)	2210.2 (28.8)	2552.1 (12.6)

## B Einzelergebnisse der ERGUN-Koeffizienten

Tabelle B.1: Berechnete ERGUN-Koeffizienten mit Standardabweichung und Bestimmtheitsmaß für das Aquifermaterial durch Minimierung der Quadratsumme für alle Versuchskonfigurationen

Versuchsnummer	$A_E$ [-]	$a_F$ [s/m]	$\sigma_{AE}$ [-]	$\sigma_{aF}$ [s/m]	$R^2$
2	253.7	3003.5	0.5	5.9	0.998
3	247.5	3174.7	0.6	8.1	0.999
4	237.8	2929.5	0.4	5.2	0.999
5	263.8	3707.1	0.5	7.5	0.999
6	243.1	3037.5	0.8	9.5	0.998
7	227.5	3105.5	0.9	11.9	0.999
9	245.2	3087.0	0.6	7.4	0.999
10	243.3	3216.3	2.3	30.3	0.998
12	182.9	2702.3	0.7	9.8	0.999
13	236.1	3369.3	2.4	34.5	0.998
14	242.6	2840.5	8.2	95.7	0.993
15	207.5	2852.8	1.7	22.9	0.999
16	223.4	2904.7	1.2	15.5	0.999
17	181.9	3145.3	1.1	19.2	0.998
18	162.9	2840.5	1.0	17.4	0.998
19	229.4	3800.4	1.6	26.3	0.998
20	240.2	3554.7	5.3	79.1	0.998
21	175.6	3140.4	2.9	51.1	0.993
23	188.2	3223.8	1.2	21.3	0.998
24	242.2	3581.7	2.7	39.6	0.998
25	197.0	3029.1	2.9	43.9	0.996
27	206.5	3082.5	1.0	14.3	0.998
28	202.3	3012.6	0.6	8.6	0.999
30	242.8	3080.9	6.2	78.2	0.993
32	189.1	2657.5	1.9	27.2	0.999
33	199.6	2869.6	1.9	27.4	0.998
35	193.7	2755.5	1.7	23.5	0.999
36	233.2	2989.8	1.9	24.0	0.997
37	207.3	3230.5	0.3	4.9	0.998
39	162.2	2882.3	0.7	13.0	0.998
40	227.1	3179.5	0.7	9.6	0.998
41	240.0	2981.1	0.8	9.4	0.998
42	142.9	3168.8	0.4	9.5	0.998

Versuchsnummer	$A_E$ [-]	$a_F$ [s/m]	$\sigma_{AE}$ [-]	$\sigma_{aF}$ [s/m]	$R^2$
44	267.7	3364.8	0.4	5.4	0.999
45	166.5	3094.8	0.8	14.8	0.999
46	224.2	3544.1	1.9	30.8	0.997
47	257.7	3211.8	0.7	8.7	0.995
48	181.7	3041.5	0.3	5.0	0.999
49	157.3	2942.1	0.4	8.4	0.999
51	180.7	2731.9	0.2	3.5	0.999
52	253.7	3008.9	0.7	8.5	0.998
53	177.2	2755.4	1.1	16.8	0.996
54	295.4	5077.5	2.7	46.1	0.997
56	246.9	3300.8	1.4	19.2	0.998
57	226.2	3683.2	1.5	24.1	0.997
59	189.9	2927.6	0.5	7.8	0.999
61	213.3	2771.3	2.6	33.7	0.999
62	253.3	3288.6	1.1	14.7	0.998
64	261.6	3064.8	4.2	48.7	0.997

Tabelle B.2: Berechnete ERGUN-Koeffizienten des Schüttmaterials durch Minimierung der Fehlerquadratsumme für die einzelnen Versuchskonfigurationen mit mindestens zwei Druckmesspunkten im Schüttmaterial

Versuchsnummer	$r_{i,FK}$ [m]	$r_{j,FK}$ [m]	Schüttmaterial [mm]	$A_E$ [-]	$B_E$ [-]	$R^2$
13	0.27	0.21	1.4-2.2	291.0	3.65	0.9998
13	0.27	0.23	1.4-2.2	293.4	3.76	0.9997
15	0.27	0.23	0.7-2.2	323.0	6.65	0.9993
16	0.27	0.23	1.25-1.65	164.9	2.19	0.9997
17	0.27	0.23	0.7-1.4	340.7	1.19	0.9996
18	0.27	0.23	1.4-2.2	309.2	2.96	1.0
19	0.27	0.23	1.4-2.2	265.2	3.38	0.9994
19	0.425	0.23	1.4-2.2	282.5	2.21	0.9993
19	0.425	0.27	1.4-2.2	288.7	1.65	0.9993
20	0.425	0.23	1.4-2.2	315.6	2.72	0.9985
20	0.27	0.23	1.4-2.2	297.3	3.67	0.9988
20	0.425	0.27	1.4-2.2	322.1	2.27	0.9983
23	0.32	0.27	1.4-2.2	309.1	1.91	0.9995
23	0.425	0.27	1.4-2.2	333.4	1.48	0.9996
23	0.425	0.32	1.4-2.2	348.0	1.16	0.9996
24	0.425	0.27	1.4-2.2	316.2	1.50	0.9984
24	0.32	0.27	1.4-2.2	306.8	2.62	0.9985
24	0.425	0.32	1.4-2.2	321.8	0.65	0.9982
25	0.27	0.23	1.25-1.65	156.0	1.53	0.9998
30	0.27	0.23	1.4-2.2	264.8	7.23	0.9629
39	0.32	0.27	1.4-2.2	285.3	4.05	0.9999
39	0.425	0.27	1.4-2.2	298.1	3.82	0.9999
39	0.425	0.32	1.4-2.2	305.8	3.64	0.9998
45	0.27	0.23	1.4-2.2	311.3	3.56	0.9997
49	0.27	0.23	2.0-3.15	379.1	2.90	0.9999
54	0.27	0.23	2.0-3.15	369.6	0.84	0.9985
56	0.27	0.23	1.4-2.2	289.4	2.71	1.0
57	0.27	0.23	1.4-2.2	254.6	6.20	0.9933

## C Trennflächendruckdifferenzen

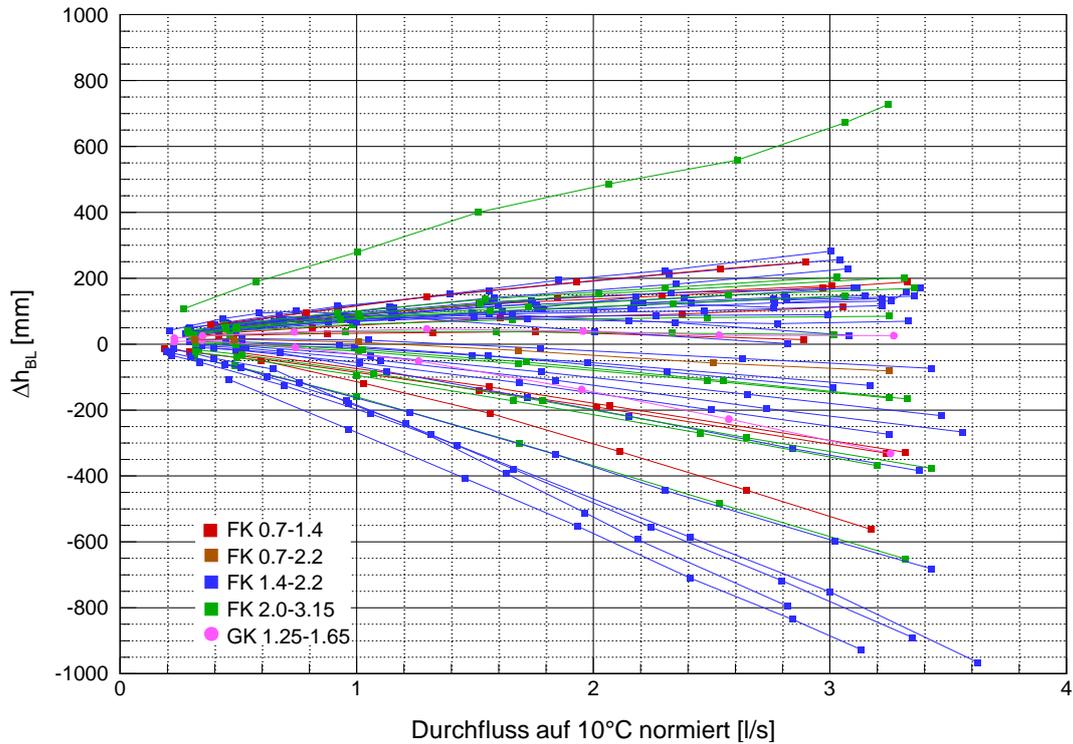


Abbildung C.1: Trennflächendruckdifferenz am Bohrloch in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration

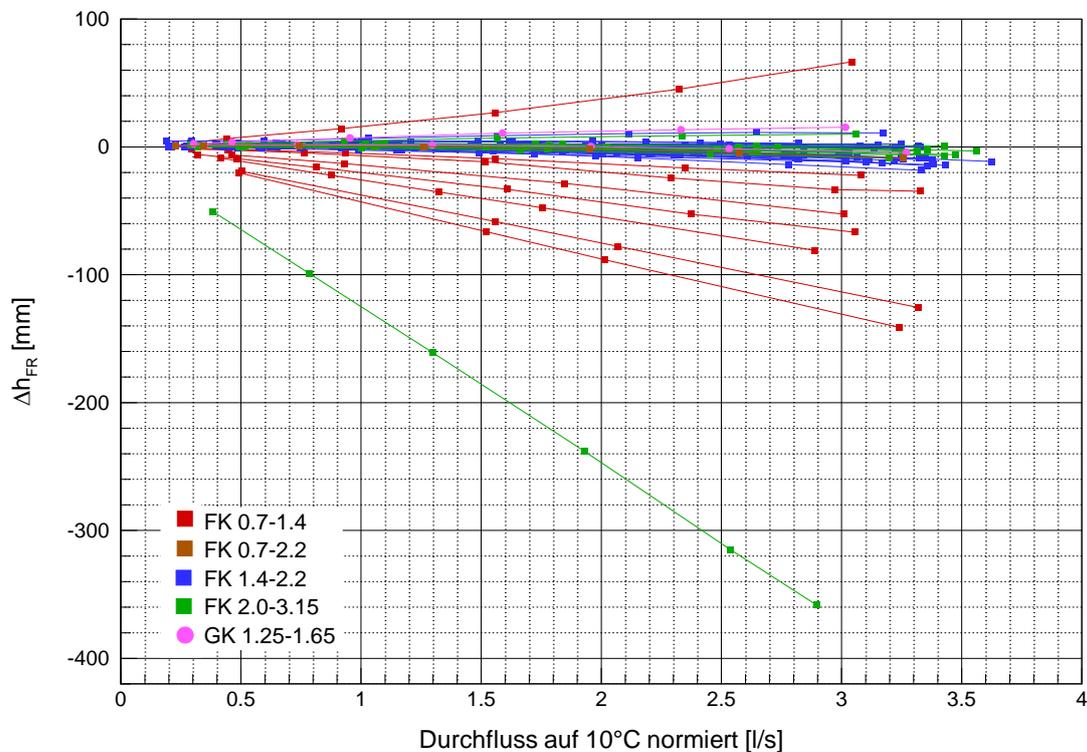


Abbildung C.2: Trennflächendruckdifferenz am Filterrohr in Abhängigkeit vom normierten Durchfluss für jede Versuchskonfiguration

## D Reynoldszahlen Anwendungsbeispiel

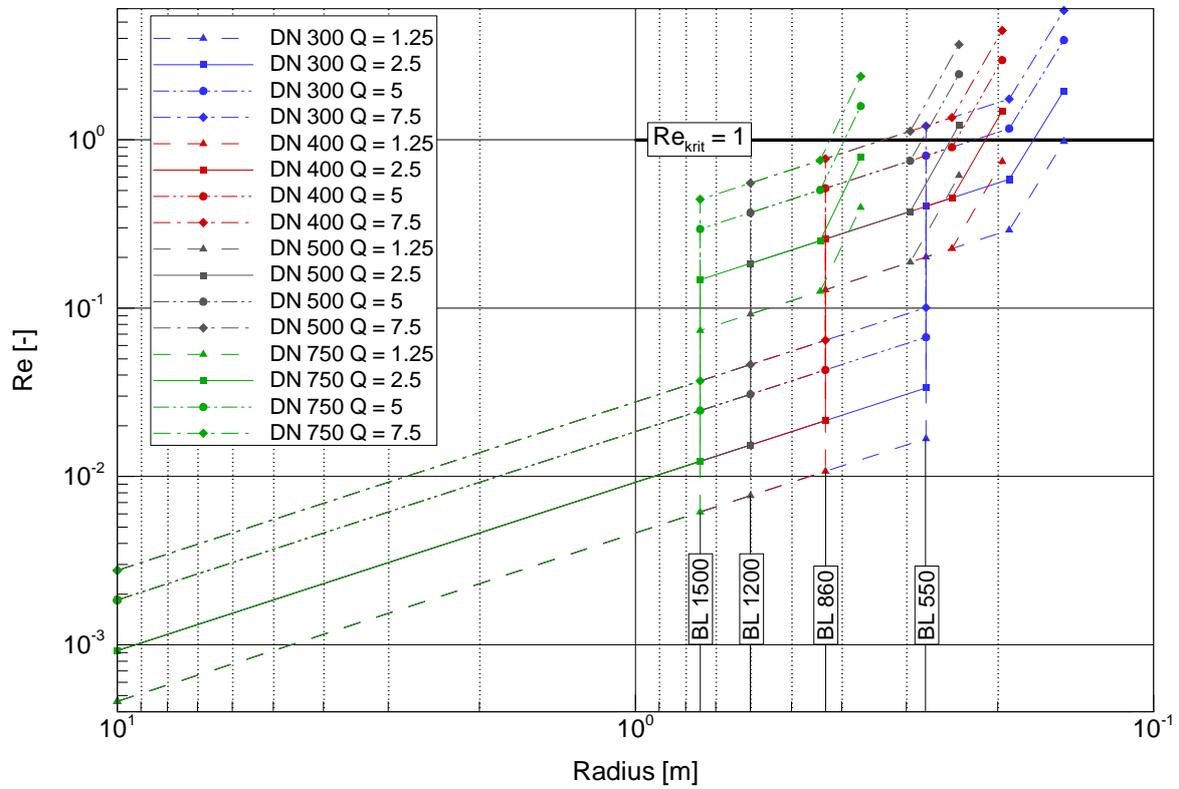


Abbildung D.1: Reynoldszahlen in Abhängigkeit vom Radius für die Variation der Entnahmemenge Q im Anwendungsbeispiel bei vier verschiedenen Bohrlochgeometrien

## Danksagung

Am Schluss möchte ich denjenigen danken, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Angestellte am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen. Daher möchte ich zunächst Professor Köngeter für die Aufnahme in das Institut und die Unterstützung meiner Forschungsarbeit danken. Nach der Emeritierung von Professor Köngeter hat Professor Schüttrumpf als Hauptreferent die Betreuung der Arbeit übernommen, engagiert weitergeführt und mir in Diskussionen viele hilfreiche Anregungen gegeben. Professor Treskatis und Professor Forkel haben die Arbeit im Entstehungsprozess begleitet und durch wertvolle Hinweise bereichert. Für das Interesse und die Diskussionsbereitschaft danke ich allen Professoren.

Ich hatte das Glück, in beiden Institutsabteilungen – die Versuchshalle und den Lehrstuhl – arbeiten zu dürfen und möchte mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für die gute Zusammenarbeit und die tolle Arbeitsatmosphäre bedanken. Durch die gemeinsame Arbeit an zahlreichen Forschungsprojekten habe ich gerade von den Werkstätten viel gelernt. Ein besonderer Dank gilt meinem Kollegen Sebastian Henkel, der im Rahmen seiner studentischen Hilfstätigkeit am Institut die Brunnenmodellversuche betreut hat und den Großteil der Zeichnungen für meine Arbeit angefertigt hat. Meinem Kollegen Sebastian Roger danke ich für die Diskussionen während unserer Laufrunden und meinem Kollegen Nils Huber für die Einführung in die Stochastik.

RWE Power AG und besonders den Mitarbeitern Herrn Adenau und Herrn Müller möchte ich für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung der Forschungsarbeit danken.

Meinen fleißigen Korrekturlesern Maren Niemeyer, Sabine Kuchel-Grotjahn und Torsten Rose möchte ich Danke sagen für all die Zeit, die sie investiert haben, um die Fehler zu finden, und für die vielen hilfreichen Anregungen.

Bei meiner Familie und meinen Freunden bedanke ich mich für die viele Unterstützung und Motivation während dieser langen Zeit. Meinem Lebenspartner Gerald Vieth gebührt der größte Dank, da er mich durch alle Höhen und Tiefen liebevoll begleitet hat. Dank der vielen, lieben Aufmunterungen und manchmal willkommenen Ablenkungen kann ich nun sagen:

Es ist vollbracht!

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Wiebke Solveigh Klauder  
Geburtsdatum: 16.02.1978  
Geburtsort: Kiel

## Wissenschaftlicher Werdegang

01/2006 – 12/2010      Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
   Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen

04/2004 – 12/2005      Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
   Ökologie-Zentrum der Christian-Albrechts-Universität Kiel  
   Fachabteilung Geobotanik

10/2001 – 03/2004      Studentische Hilfskraft am Institut für Wasserbau der TU Ham-  
   burg-Harburg

## Studium

10/1997 – 03/2004      Diplomstudium Bauingenieurwesen und Umwelttechnik an der  
   TU Hamburg-Harburg mit den Vertiefungsrichtungen Wasser-  
   bau, Geotechnik und Massivbau

## Schulbildung

08/1988 – 06/1997      Ernst-Barlach-Gymnasium Kiel (Allgemeine Hochschulreife)

08/1984 – 06/1988      Grundschule am Sonderburger Platz, Kiel