Mitt. POLLICHIA	82	37 – 80	27 Abb.	5 Tab.	Bad Dürkheim 1995
					ISSN 0341-9665

Thorsten SCHÄFER

Laboruntersuchungen zur hydrodynamischen Mobilisation von Feinstpartikeln in Festgesteinsproben der Haardtrandfazies des Pfälzer Buntsandsteins

Kurzfassung

SCHÄFER, T. (1995): Laboruntersuchungen zur hydrodynamischen Mobilisation von Feinstpartikeln in Sandsteinen der Haardtrandfazies des Pfälzer Buntsandsteins. – Mitt. POLLICHIA, **82**: 37 – 80, Bad Dürkheim.

Gegenstand der Laboruntersuchungen war die Mobilisation authigener Feinstpartikel in fein- bis mittelsandigen, fluviatil schräggeschichteten Festgesteinsproben des Mittleren Buntsandsteins zur Abschätzung der kritischen Fließgeschwindigkeit v_c der Permeabilitätsschädigung. Bei Fluidgeschwindigkeiten des laminaren Flusses mit Reynolds-Zahlen ≤10 (JAKOB, 1950; TODD, 1959) und Leitungswasser als Fließmedium zeigten die horizontal gebohrten Kerne Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f) von $3{,}5 \cdot 10^{-6}$ - $3 \cdot 10^{-7}$, währenddem die senkrecht erbohrten Kerne einen k_f-Wert von $2 \cdot 10^{-8}$ - $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ aufwiesen. Dieser starke Durchlässigkeitsunterschied konnte mit Ton- bzw. Siltlaminae senkrecht zur Fließrichtung erklärt werden.

Die beobachtete Permeabilitätsreduktion in Durchströmungsversuchen zeigte einen exponentiellen Verlauf mit einer maximalen Reduktion von zwei Zehnerpotenzen. Als dominanter Transportmechanismus der Feinstpartikeldeposition konnte in Probenkernen mit Permeabilitätsreduktion der Siebeffekt herausgearbeitet werden. (Kugel-Kollektor Modell nach BEDBUR, 1989). Das Eintreten einer Permeabilitätsschädigung ist neben dem dominanten Transportmechanismus weiterhin vom Anteil vernetzter leicht dränbarer grober Poren > 50 µm abhängig, der aus Saugspannungskurven ermittelt wurde.

Die Berechnung eines physiko-chemischen Ansatzes der auf ein Partikel im Porenraum wirkenden Kräfte (Kugel-Platten Modell nach NASR-EL-DIN, 1991) zeigte stabilisierende chemische Kräfte bei Wässern hoher Ionenstärke, wie sie in diesen Laborversuchen verwandt wurden. In typisch niedrig mineralisierten Wässern siliciklastischer Aquifere konnte gezeigt werden, daß eine abstoßende resultierende Kraft bei einer Fließgeschwindigkeit > 2cm/d vorliegt.

Auf Grund des linearen Zusammenhangs zwischen Permeabilitätsreduktion und Fließgeschwindigkeit (GRUESBECK & COLLINS, 1982) konnte eine kritische Fließgeschwindigkeit v_c von 1,7 ± 0,8 m/Tag für die Gesteine des Steinbruchs „Kiefer-Reul-Teich" ermittelt werden.

Abstract

SCHÄFER, T. (1995): Laboruntersuchungen zur hydrodynamischen Mobilisation von Feinstpartikeln in Sandsteinen der Haardtrandfazies des Pfälzer Buntsandsteins.

[Investigations concerning the hydrodynamic mobilization of fines in sandstone core samples of the "Haardtrandfazies", Palatine Buntsandstein]. – Mitt. POLLICHIA, **82:** 37 – 80, Bad Dürkheim.

Fines migration of authigenic minerals in core samples of a fine to medium grained Middle Buntsandstein with fluvial cross bedding structures were experimentally investigated. The effect of flow velocity, flow direction, chemical composition of fluid and pore size distribution were evaluated. At fluid velocities of laminar flow with a REYNOLDS value ≤10 (JAKOB, 1950 and TODD, 1959) the horizontal drilled core samples show k_f-values from $3,5 \cdot 10^{-6}$ - $3 \cdot 10^{-7}$, whereas vertical drilled core samples have k_f-values from $2 \cdot 10^{-8}$ to $1,5 \cdot 10^{-9}$, which could be explained by fine clay to silty laminas perpendicular to the flow direction.

The observed permeability reduction shows an exponential decline of maximum 10^2 with the filter effect as the most important force for particle deposition (ball-collector model after BEDBUR, 1989). The observed permeability reduction depends also on the rate of connected pores with a diameter > 50 µm, which were analyzed by water tension curves.

The used physico-chemical approach of forces acting to a fines particle (ball-plate model after NASR-EL-DIN, 1991) showed more stabilizing chemical conditions in waters with high ionic strength as used in these laboratory studies. At typical low ionic strengths of siliceous aquifer systems the resulting force acting to a particle is always repulsive if the flow velocity is higher than 2cm/d.

Because of the linear dependence between fluid velocity and permeability reduction (GRUESBECK & COLLINS, 1982) a critical fluid velocity v_c of 1,9 ± 0,8 m/d for core samples of the "Kiefer-Reul-Teich" quarry could be investigated.

Résumé

SCHÄFER, Th.: Laboruntersuchungen zur hydrodynamischen Mobilisierung von Feinstpartikeln in Festgesteinsproben der Haardtrandfazies des Pfälzer Buntsandsteins

[Essais de laboratoire concernant la mobilisation hydrodynamique des particules fines dans des échantillons gréseux du faciès de la bordure de la Haardt du Buntsandstein palatin]. – Mitt. POLLICHIA, **82:** 37 – 80, Bad Dürkheim

Les essais de laboratoire analysent la mobilisation des particules fines et authigènes dans des échantillons gréseux fluviatiles avec un litage oblique, lesquelles appartiennent au Buntsandstein Moyen, dans le but d'évaluer la vélocité d'écoulement laminaire de ≤ 10 (mesurées en chiffres Reynolds) (JAKOB 1950, TODD 1959) et avec de l'eau du robinet comme médium d'écoulement, les noyaux forés horizontalement indiquent des valeur de perméabilité de $3,5 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-7}$ tandis que les noyaux forés verticalement possèdent une valeur k_f de $2 \times 10^{-8} - 1,5 \times 10^{-9}$. On peut expliquer cette différence de perméabilité remarquable par les lamines de silt et d'argile perpendiculaires à la direction d'écoulement. La réduction de perméabilité observée manifest un déclin exponentiel d'un maximum de 10^2. Dans des noyaux de prélèvements indiquant une réduction de perméabilité, l'effet du filtre s'avère être le mécanisme principal de transport pour le dépôt des particules fines (modèle avec une boule et un collecteur selon BEDBUR 1989). A part le mécanisme de transport principal, une atteinte à la perméabilité est dépendante du taux des pores reliés entre eux et facilement drainables avec un diamètre de plus de 50 mm. Ce taux est dérivé des courbes indiquant la tension d'aspiration.

L'évaluation physico-chimique utilisée dans le but de déduire les forces qui agissent sur une perticule dans les pores (modèle avec une boule et des plaques selon NASR-EL-DIN 1991) révèle des forces chimiques stabilisantes dans des eaux avec une concentration élevée en ions. Dans les eaux des aquifères siliceuses, qui possèdent des taux d'ions réduits, on a pu constater une force repoussante lors d'une vélocité d'écoulement de ≥ 2 cm/jour.

En raison d'une dépendance linéaire entre la réduction de perméabilité et la vélocité d'écoulement (GRUESBECK & COLLINS 1982), on a pu déduire une vélocité d'écoulement critique v_c de 1,7 ± 0,8 m/jour pour les roches de la carrière «Kiefer-Reul-Teich».

SCHÄFER: Laboruntersuchungen zur hydrodynamischen Mobilisation von Feinstpartikeln in Festgesteinsproben der Haardtrandfazies des Pfälzer Buntsandsteins

1. **Einleitung** 39
   1.1 Lage der Probennahme und geologischer Rahmen 40
2. **Grundlagen** 42
3. **Arbeitsmethodik** 47
4. **Ergebnisse** 49
   4.1 Festgesteinsparameter 49
   4.2 Chemisch-hydraulische Parameter 52
   4.3 Feinstpartikelanalytik 57
5. **Interpretation und Diskussion** 60
   5.1 Festgesteinsparameter 60
   5.2 Chemisch-hydraulische Parameter 62
   5.3 Feinstpartikelanalytik 63
   5.4 Modellrechnungen 66
   5.5 Abschätzung der kritischen Filtergeschwindigkeit 74
6. **Ausblick** 75
7. **Danksagung** 77
8. **Literaturverzeichnis** 78

1 Einleitung

Die Mobilisation und Migration von Feinstpartikeln in porösen Medien ist sowohl von wissenschaftlichem als auch von wirtschaftlichem Interesse. Die hydrochemische oder hydrodynamische Mobilisierung der im porösen Medium vorhandenen Feinstpartikel kann zu den Problemen der Bodenerosion und damit verbundenem Versagen von Erddämmen oder der Wasserempfindlichkeit mit resultierenden Injektions- und Produktionsproblemen in Öl- und Gas-Sandstein-Lagerstätten, sowie im Bereich der Grundwassergewinnung führen. Eine weitere in diesem Zusammenhang zu erwähnende Problematik ist der kolloidale und partikuläre Schadstofftransport von Schwermetallen und Radionukliiden.

Das Problem der durch „in situ"-Feinstpartikelmobilisation induzierten Permeabilitätsschädigung wird in dieser Arbeit an Festgesteinproben näher untersucht.

GRUESBECK & COLLINS (1982) konnten bei der Betrachtung hydrodynamischer Rahmenparameter die Existenz einer kritischen Filtergeschwindigkeit v_c bei einer chemisch kompatiblen benetzenden Phase beobachten, oberhalb der es zu einer Feinstpartikelmobilisation mit Permeabilitätsreduktion kommt, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen der Permeabilitätsreduktion und der Filtergeschwindigkeit festgestellt wurde. Unterhalb dieser v_c besteht keine Permeabilitätsschädigung, obwohl eine Mobilisation von Feinstpartikeln festzustellen war.

Die detaillierte Studie von MUECKE (1978) zur Abhängigkeit der Feinstpartikelmobilisation vom Mehrphasenfluß zeigte auf, daß Feinstpartikel nur transportiert werden, wenn die benetzende Phase mobil ist.

Das Verhältnis zwischen Feinstpartikelgrößenverteilung und Porengrößenverteilung spielt eine große Rolle in der mechanischen Verstopfung von Porenhälsen. In der Arbeit von O'MELIA & ALI (1978) wurde anhand der Variation der Größenverteilung der Feinstpartikel aufgezeigt, daß bei gegebener Porengrößenverteilung eine bestimmte Größenverteilung der Feinstpartikel minimale Schäden der Porosität und Permeabilität verursacht.

Die absolute von Feinstpartikelmobilisation unbeeinflußte Anfangspermeabilität des durchströmten Mediums und die Lage der Feinstpartikel ist nach COSKUMER (1989) von Wichtigkeit für Aussagen zur möglichen Permeabilitätsschädigung. Dabei zeigt sich bei hohen Anfangspermeabilitäten eine geringe Anfälligkeit gegenüber mechanischer Mobilisation, aber es besteht die größere Anfälligkeit gegenüber quellfähigen tonmineralischen Feinstpartikeln. Ein stärker kontrollierender Faktor ist nach NEASHAM (1977) die Verteilung der Feinstpartikel bzw. Tonminerale im Porenraum und im Gesamtgestein, sowie ih-

re Morphologie für aussagekräftige Schadensabschätzungen. Eine Angabe des totalen Tonmineralgehaltes des Gesamtgesteins bzw. die Mineralogie ist in diesem Zusammenhang wenig aussagekräftig.

Nach KHILAR & FOGLER (1984) hat die Ionenstärke eines durchströmenden Fluids eine große Bedeutung für die absolute Energie der Tonmineral-Partikel. Hohe Permeabilitätsverluste von zwei bis drei Größenordnungen in porösen Medien zeigen sich bei Durchströmung von zwei bis drei Porenvolumen destilliertem Wasser nach Durchfluten mit Salzlösungen (KHILAR & FOGLER, 1983). Dies ist auf Blockierung von Porenkanälen durch Feinstpartikel zurückzuführen, die durch erhöhte Doppelschicht-Abstoßung mobilisiert wurden. Diese Beobachtung der Permeabilitäts-Reduktion mit der Salinität des Fluids zeigt sich auch nach SHARMA & YORTSOS (1986) bei einem Sinken der Ionenstärke unter eine kritische Salzkonzentration, (CSC = critical salt concentration), unter der die Doppelschicht-Abstoßungskräfte dominant sind.

Die Änderungsrate verschiedener Parameter, wie schnelle Veränderungen der Fließgeschwindigkeit, der Salinität oder der Temperatur hat auch einen bedeutenden Einfluß auf die Migration von Feinstpartikeln. Es existiert eine kritische Änderungsrate der Salinität (CRSD = critical rate of salinity decline), oberhalb der drastische Permeabilitätsschädigungen zu beobachten sind. Die CRSD ist eine Funktion der Fließgeschwindigkeit, das heißt bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten nimmt auch die kritische Rate der CRSD ab. KHILAR & FOGLER (1986) zeigten auf, daß die CSC im Bereich von Oberflächenfließgeschwindigkeiten von 3,2-570 cm/std unabhängig ist.

Die Valenz der Kationen des durchströmenden Fluids hat einen entscheidenden Einfluß auf die CSC. Eine Erklärung für dieses Phänomen geben Potentialkurvenverläufe über den gesamten Konzentrationsbereich der Salze. Diese Diagramme zeigen eine anziehende Kraft zwischen Porenwand und Feinstpartikel bei bivalenten Salzen im Gegensatz zu monovalenten.

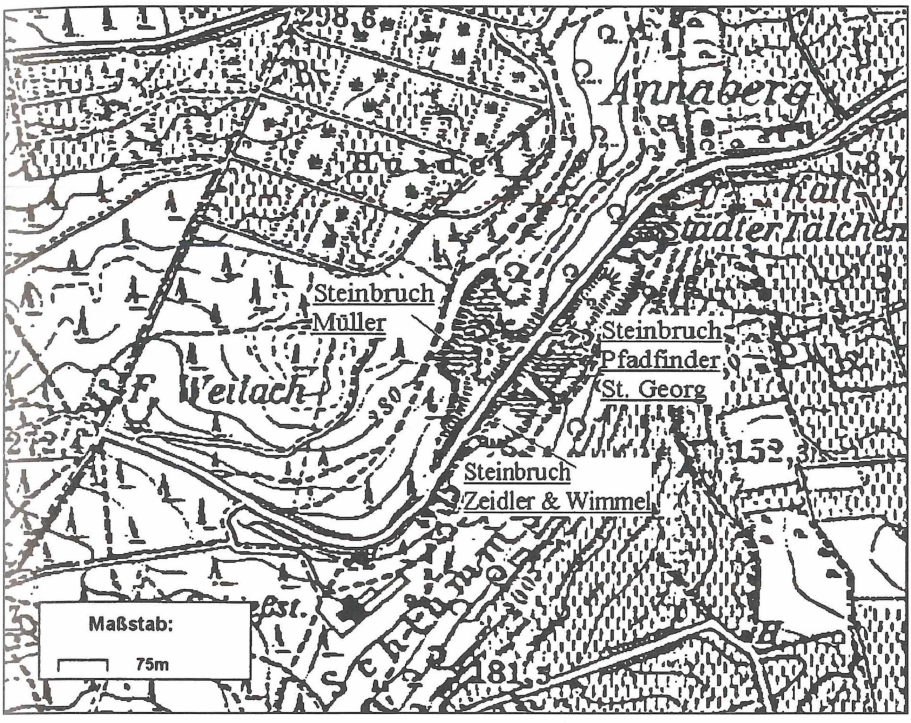
Die Schwankungen des pH-Wertes zeigen starke Auswirkungen auf die Mobilisation von Feinstpartikeln bei geringen Ionenstärken der Lösung, während das System nicht sehr sensitiv gegenüber pH-Schwankungen bei höheren Konzentrationen der Lösung ist. Dies ist auf eine Komprimierung der Doppelschicht bei großer Ionenstärke zurückzuführen, die kleinere elektrokinetische Zeta-Potentiale als Maß für den Potentialabfall über den beweglichen Teil der Doppelschicht verursacht und damit eine geringere pH-Sensitivität bei höheren Ionenstärken des Fluids generiert. Generell kann gesagt werden, daß Fluide mit niedrigen pH-Werten eine minimale Mobilisation von Feinstpartikeln bewirken, während höhere pH-Werte zu einer größeren Störung des Probenmaterials führen. Der injizierte und der pH-Wert des Eluats können aufgrund der chemischen Reaktion von Mineralen, wie Calcit und Siderit oder Ionenaustausch an Tonmineraloberflächen differieren (KIA et al., 1987).

Die kritische Salzkonzentration (CSC) ist nach KHILAR & FOGLER (1984) eine direkte Funktion der Temperatur und bei abnehmender Temperatur sind kleinere kritische Salzkonzentrationen (CSC) zu erwarten.

1.1 Lage der Probennahme und Geologischer Rahmen

Die zur Untersuchung verwendeten Proben stammen aus drei Steinbrüchen ca. 2 km nördlich von Bad Dürkheim. Einen geographischen Überblick der Steinbrüche der Probennahme zeigt Abb. 1.

Bei allen drei Probenlokationen handelt es sich um Sandsteine der Rehbergschichten (smR) des Pfälzer Buntsandsteins. Zur bestehenden Diskussion der Einstufung dieser Steinbrüche in die oberen Trifels-Schichten (nach HEITELE et al. 1987) oder die Rehberg-Schichten (SCHIELER 1991) wird auf BAUER (1994) verwiesen. Im Zuge dieser Arbeit werden die Proben als Gesteine der Rehberg-Schichten (smR) angesprochen. Die Gesteine des Buntsandsteins weisen in einem schmalen Bereich des Randgebirges entlang der westlichen



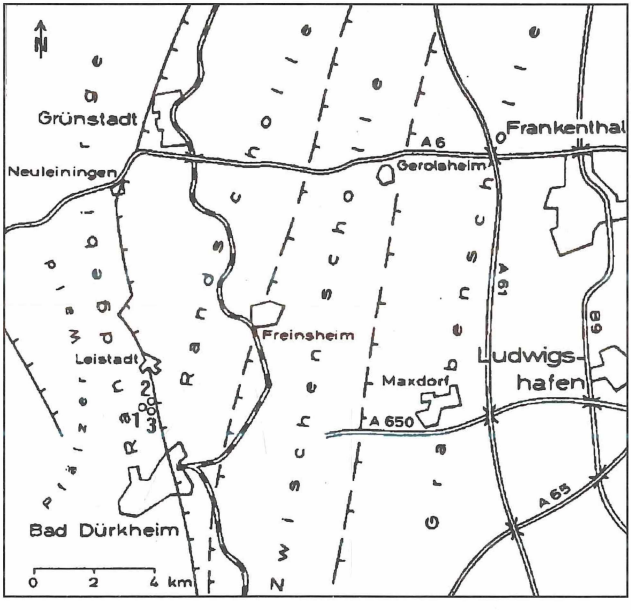


Abb. 1: Geographischer Überblick der ProbenahmeLokationen (abgeändert nach HEITELE et al. 1987)

Hauptstörung des Oberrheingrabens nicht die sonst übliche Rotfärbung, sondern eine graue bis in Ockertöne gehende Eigenfarbe auf.

Man bezeichnet diese gebleichte Varietät des Buntsandsteins als „Haardtrandfazies". Die Lokationen der Probennahme wurden im Bereich dieser „Haardtrandfazies" gewählt.

Der in den Steinbrüchen angeschnittene Bereich der Rehberg-Schichten wird aus fluviatil geschütteten, flachwinkligen Schrägschichtungskörpern mit vorwiegend Mittelsandfraktion aufgebaut und weist basal Tongallen und Tonflatschen auf. Diese Tongallen deuten auf einen geringen Transportweg der Sedimente hin und lassen eine mäßige bis schlechte Sortierung vermuten. In den Schrägschichtungskörpern können regellos eingestreute Quarzgerölle auftreten.

Bei der Wahl der Probenbezeichnung stellt der erste Buchstabe immer die Abkürzung des Steinbruchnamens dar („Müller" – **M**; „Pfadfinder St. Georg" – **P**; „ Zeidler & Wimmel" – **Z**). Es wurden in allen Steinbrüchen sowohl senkrechte als auch waagerechte Bohrkerne entnommen.

2 Grundlagen

Eine klare Definition von Feinstpartikel oder (englisch „formation fines" oder „fines") anhand der Partikelgröße, wie sie bei der Tonmineral-Fraktion durchgeführt ist, existiert für Feinstpartikel nicht. Dies führt zu einer unterschiedlichen Definition von Feinstpartikeln in verschiedenen Veröffentlichungen.

In der Arbeit von MUECKE (1978) werden Feinstpartikel als Korngröße < 37 µm definiert (Siebung mit einem 400 mesh Sieb), GABRIEL & INAMDAR (1983) gehen von 1-10 µm großen Partikeln aus und COSKUNER & MAINI (1989) sprechen in ihrer Arbeit von 4 µm als meist erachtete limitierende Obergrenze der Feinstpartikelgröße.

Im Zuge dieser Arbeit wird unter dem Begriff Feinstpartikel das bei unterschiedlichen Durchflußraten mobilisierte Kornspektrum unterschiedlicher Mineralogie verstanden. Feinstpartikel sind polymineralisch zusammengesetzt und enthalten in Abhängigkeit vom Probenmaterial unterschiedliche Gewichtsprozentanteile an Tonmineralen, Quarz, amorpher Kieselsäure, Feldspat, Glimmer, Karbonaten, Baryt und amorphen Phasen.

Die Mobilisation dieser Feinstpartikel aus porösen Medien kann sowohl durch mechanische bzw. hydrodynamische als auch durch chemische bzw. hydrochemische Kräfte erfolgen. Um diese zwei Mechanismen und die wichtigsten beeinflussenden Größen aufzuzeigen, werden die beiden angesprochenen Kräfte in dieser Arbeit getrennt behandelt.

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Charakterisierung der Mobilisierungskriterien in einem porösen Medium beschrieben, mit denen Aussagen über die mögliche Gefahr einer Feinstpartikelmobilisation gemacht werden können. Die Ansätze sind dabei sehr unterschiedlich und im Zuge dieser Arbeit werden zwei Modelle vorgestellt. Das erste beschriebene Modell beruht auf einer Bilanz der an ein Partikel im porösen Medium angreifenden hydrodynamischen bzw. hydrochemischen Kräfte, deren Summe entweder eine anziehende oder abstoßende Kraft darstellt. Der Vorteil dieses Kräftemodells ist die Möglichkeit der Abschätzung des dominanten Mechanismus für die Mobilisation der Feinstpartikel. Im Zuge dieses Modells wird eine Annahme über die Geometrie des Partikels als auch des Sedimentkorns getroffen. Die Unterschiede der in der Literatur dokumentierten Ansätze für ein solches Kräftemodell zeigen sich im wesentlichen in unterschiedlichen Geometrieannahmen der Feinstpartikel und des Sedimentkorns. Das in dieser Arbeit vorgestellte einfachste Modell eines sphärischen Partikels und einem auf Grund der Größe als planare Ebene gedachten Sedimentkorn ergibt ähnliche Ergebnisse mit geringerem Rechenaufwand, wie Platten-Platten-Modelle oder Platten-Zylinder-Modelle (KIA et al., 1987).

Die zwei wichtigsten hydrodynamischen Kräfte, die auf ein an der Oberfläche eines Sandkornes haftenden Feinst-Partikel wirken, sind eine Auftriebskraft (F_L) und eine auf

die Fluidviskosität zurückzuführende Scherkraft (F_D). Die schematische Abb. 2 erläutert die auf ein Partikel wirkenden hydrochemischen und hydrodynamischen Kräfte. Die Auftriebskraft (F_L) wirkt dabei senkrecht zur Strömungsrichtung im Porenkanal und wird beschrieben (HUBBE, 1984):

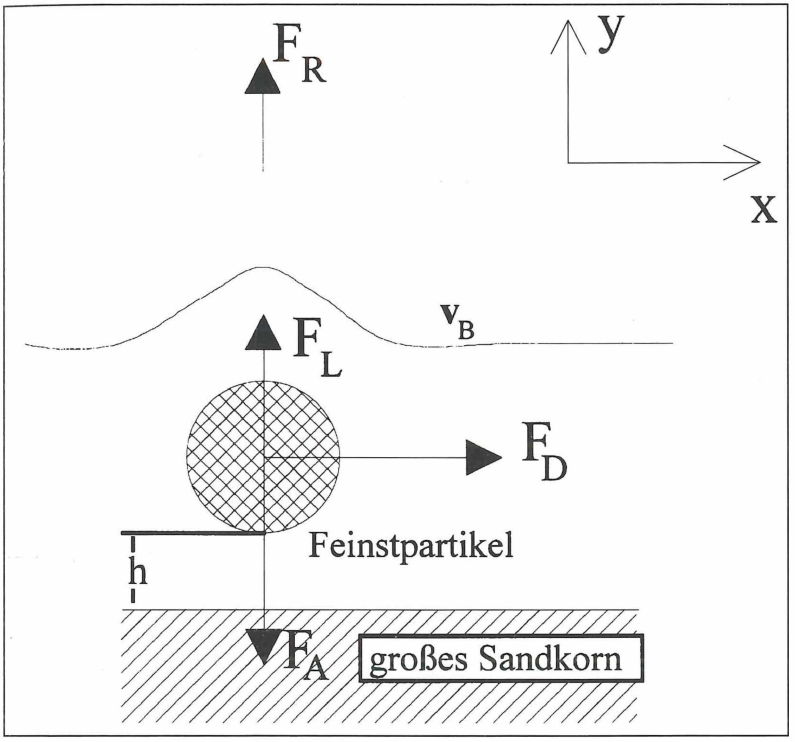


Abb. 2: Schematische Darstellung der auf ein Feinstpartikel wirkenden Kräfte im Fluidstrom.
F_A: London- van der Waalssche Kraft
F_R: Elektrische Doppelschicht Kraft
F_L: Auftriebskraft
F_D: Scherkraft
(verändert nach NASR-EL-DIN et al., 1991)

$$F_L = 81{,}2 \cdot a^2 \cdot \eta \cdot u^{-0{,}5} \cdot (dv_B/dy)^{0{,}5} \cdot v_B \qquad (1)$$

mit	a	= Partikelradius	[m]
	u	= kinematische Viskosität	[$m^2 \cdot s^{-1}$]
	v_B	= Bahngeschwindigkeit	[$m \cdot s^{-1}$]
	η	= dynamische Viskosität	[Pa · s]

Die auf ein Partikel wirkende Scherkraft (F_D) wirkt in Strömungsrichtung und wird mit folgender Gleichung beschrieben (HUBBE, 1984):

$$F_D = 1{,}7(6\pi)\eta \cdot a \cdot v_B \qquad (2)$$

mit	a	= Partikelradius	[m]
	v_B	= Bahngeschwindigkeit	[$m \cdot s^{-1}$]
	η	= dynamische Viskosität	[Pa · s]

Die Größe dieser hydrodynamischen Kräfte, die beide als mobilisierende Kräfte bezeichnet werden können, da sie dem Zusammenhalt zwischen Sandkorn und Feinstpartikel entgegenwirken, steigt mit erhöhter Fluidgeschwindigkeit, Fluid-Viskosität und dem Radius der Feinstpartikel.

Unter dem Begriff hydrochemische Kräfte sind die auf ein Feinst-Partikel wirkenden London-van der Waalsschen Anziehungskräfte, die Born-Abstoßungskraft, die elektrische Doppelschicht-Kraft und Hydratationskräfte zu verstehen.

Die London-van der Waalssche Anziehungskraft (F_A) zwischen einem kleinen sphärischen Partikel und einem großen Sandkorn hängt von dem Abstand der beiden Partikel (h), der Hamaker Konstante (A) und dem Radius des Feinstpartikels (a) ab (OKADA et al., 1990):

$$F_A = -\frac{a\,A}{6h^2} \qquad [N] \tag{3}$$

Die elektrische Doppelschicht-Rückstoßkraft (F_R) für die oben beschriebene Modellvorstellung ist durch Gleichung (4) gegeben (OKADA et al., 1990):

$$F_R = 4\,\pi\,e\,k\,a\,f_1 \cdot f_2\,\frac{\exp(-kh)}{1+\exp(-kh)} \qquad [N] \tag{4}$$

In dieser Formel sind f_1 und f_2 die Oberflächenpotentiale der beiden Partikel, e die Dielektrizität-Konstante des Fluids, k die reziproke Debye-Hückel Länge und h der Abstand zwischen Partikel und Korn.

Die Dicke der elektrischen Doppelschicht ist stark abhängig von der Ionenstärke I der Lösung. Für aquatische Lösungen ausgeglichener Ionenbilanz ist diese Dicke der elektrischen Doppelschicht 1/k nach folgender Formel bei 25° C zu berechnen (HUNTER, 1981):

$$\frac{1}{k} = \frac{0{,}304 \cdot 10^{-9}}{I^{0{,}5}} \qquad [m] \tag{5}$$

I ist in dieser Formel die molare Ionenstärke.

Die Dicke der elektronischen Doppelschicht und damit die abstoßende Kraft nimmt mit steigender Konzentration der Ionenlösung stark ab, so daß dieser Effekt für die Feinst-Migration vernachlässigbar wird (Abb. 3). Wie aus dieser einfachsten Modellvorstellung eines sehr kleinen sphärischen Partikels in Interaktion mit einem sehr großen Sandkorn deutlich wird, steht die Feinstpartikelmobilisation in einem komplexen Zusammenhang mit hydrodynamischen und hydrochemischen Eigenschaften des Fluids und geometrischen Eigenschaften des porösen Mediums.

Eine weitere Möglichkeit bietet eine Abschätzung der porengeometrischen Umlagerungsmöglichkeit und eine Berechnung des hydraulischen Potentials, das für den Partikeltransport nötig ist. Dieser Ansatz der Suffosion und Kolmation wurde vor allem von BUSCH & LUCKNER (1974) entwickelt und kommt in dieser Arbeit vergleichend zur Anwendung.

Mit der Beschreibung der Kolmation von BUSCH & LUCKNER (1974) wird die Möglichkeit einer Abschätzung der Ablagerung bereits durch Suffosion mobilisierter Feinstpartikel gegeben, jedoch enthält diese Angabe keine Information über den Ablagerungsmechanismus. Die Änderung der Konzentration C der Feinstpartikel mit der Filterstrecke l und dem Filterfaktor λ kann nach IWASAKI (1937) mit dem kinetischen Gesetz erster Ordnung der Gleichung (6) beschrieben werden:

$$C = C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot l} \tag{6}$$

mit C_0 = Ausgangskonzentration [mol. $\cdot$ l^{-1}]

Der Filterfaktor hängt von den Rahmenparametern der Hydraulik, der Hydrochemie und der Sedimentologie ab. In der Arbeit von BEDBUR (1989) findet sich eine Zusammenstellung der dominanten Transportmechanismen unter Annahme eines Kugelkollektor-

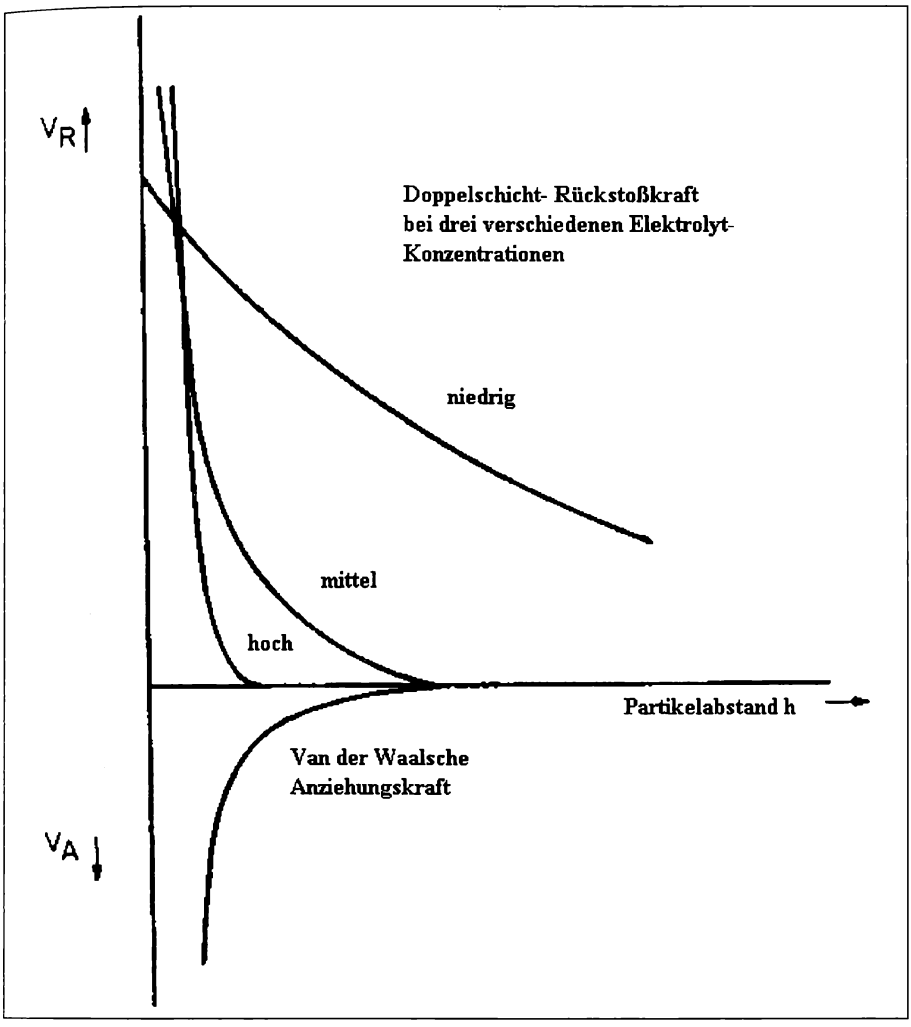


Abb. 3: Hydrochemische Kräfte bei verschiedener Ionenstärke der Lösung in Abhängigkeit des Partikelabstandes (verändert nach VAN OLPHEN, 1963)

modells aus Elementarschichten mit dem Einzelkollektorabscheidegrad γ^* und dem elementaren Abscheidegrad γ. Mit dem Einzelkollektorabscheidegrad γ^* läßt sich nach GIMBEL (1978) der Filterfaktor λ nach Gleichung (7) berechnen:

$$\lambda = \frac{3}{2} \cdot (1\text{-}n) \cdot \frac{1}{d} \cdot \gamma^* = \frac{\gamma}{d} \qquad (7)$$

wobei d den Filterkorndurchmesser bezeichnet und in dieser Arbeit dem wirksamen Korndurchmesser des Sediments entsprechen soll ($d \approx d_w$).

Der elementare Abscheidegrad γ ist das Produkt aus der Transportwirksamkeit γ_T und der Haftwahrscheinlichkeit γ_H.

$$\gamma = \gamma_T \cdot \gamma_H \qquad (8)$$

Die Haftwahrscheinlichkeit γ_H ist nach BEDBUR (1989) bei Ionenstärken < 0,005 mol/l deutlich kleiner als 1 und hat ab einer Ionenstärke von 0,01 mol/l auch bei weiterer Erhöhung der Ionenstärke keinen Einfluß mehr auf den Filterfaktor λ ($\gamma_H \Rightarrow 1$). Nach BEDBUR (1989) kann die Haftwahrscheinlichkeit γ_H nach der empirisch gefundenen Beziehung zwischen Haftwahrscheinlichkeit und Debye-Hückel-Parameter k der Gleichung (9) berechnet werden:

$$\gamma_H = 1{,}56 + 0{,}335 \cdot \ln\left(\frac{k}{k_0}\right) \qquad (9)$$

mit $k_0 = 1 nm^{-1}$

Die Transportwirksamkeit γ_T setzt sich additiv im wesentlichen aus den Einzelbeträgen der Interception γ_I, der Sedimentation γ_G, der Diffusion γ_D und des Siebeffektes γ_S zusammen. Die Transportwirksamkeit gibt die Wahrscheinlichkeit eines Kontaktes zwischen Partikel und innerer Filteroberfläche an. Es folgt für die Transportwirksamkeit:

$$\gamma_T = \gamma_I + \gamma_G + \gamma_D + \gamma_S \qquad (10)$$

Die Interception beschreibt den Kontakt zwischen einem Partikel und Korn bei einem Abstand kleiner dem Partikelradius unter Annahme einer Bewegung des Teilchens mit dem Mittelpunkt auf einer Stromlinie im laminaren Strömungsbereich. Nach YAO (1968) ergibt sich für den Einzelkollektorabscheidegrad der Interception γ_I^*:

$$\gamma_I^* = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{d_p}{d}\right)^2 \qquad (11)$$

mit d_p = Partikeldurchmesser [m]
d = Filterkorndurchmesser [m]

Für die Sedimentation γ_G^* läßt sich der Einzelkollektorabscheidegrad nach YAO et al. (1971) mit Gleichung (12) berechnen:

$$\gamma_G^* = \frac{g \cdot d_p^2 \cdot (\rho_F - \rho_W)}{18 \cdot \eta \cdot v_f} \qquad (12)$$

mit d_p = Partikeldurchmesser [m]
η = dynamische Viskosität [Pa · s]
φ_W = Dichte des Wassers [g · cm^{-3}]
φ_F = Dichte des Festgesteins [g · cm^{-3}]
v_f = Filtergeschwindigkeit [m · s^{-1}]
g = Erdbeschleunigung [m · s^{-2}]

Die Sedimentation nimmt größere Werte bei steigenden Partikeldurchmesser und/oder einer größeren Dichtedifferenz an, während bei erhöhter Fluidviskosität oder einer hohen Filtergeschwindigkeit eine niedrige Sedimentation zu erwarten ist.

Die Diffusion γ_D^* beschreibt eine durch Wärmebewegung induzierte Stoßbewegung der dispergierten Partikel, die bei einem translatorischen Konzentrationsgradienten z.B. im Bereich der Filterkornoberfläche als Folge der Brownschen Molekularbewegung beschrieben werden kann. Nach YAO (1968) ergibt sich für den Einzelkollektorabscheidegrad der Diffusion:

$$\gamma_D^* = 0{,}9 \cdot \left(\frac{k_B \cdot T}{v_f \cdot \eta \cdot d_p \cdot d}\right)^{2/3} \qquad (13)$$

wobei v_f = Filtergeschwindigkeit [m · s^{-1}]
d_p = Partikeldurchmesser [m]
d = Filterkorndurchmesser [m]
η = dynamische Viskosität [Pa · s]
T = Temperatur [K]
k_B = Boltzmann-Konstante [1,3806 · 10^{-23} JK^{-1}]

Aus Gleichung (13) wird deutlich, daß mit Zunahme der Temperatur und/oder Abnahme des Partikel bzw. Filterkorndurchmessers eine Erhöhung des Einzelkollektorabscheidegrades erfolgt, während die Erhöhung der Filtergeschwindigkeit bzw. Fluidviskosität zur Abnahme von γ_D^* führt.

Der Siebeffekt γ_S^* tritt nur dann auf, wenn das im Fluidstrom transportierte Partikel größer als die Porenöffnung ist. Von NEUMANN (1983) wird eine Abschätzung des Einzelkollektorabscheidegrades des Siebeffekts γ_S^* unter Annahme einer kubischen Kugelpackung gegeben, die in Gleichung (14) angeführt ist:

$$\gamma_S^* = 2{,}7 \cdot \left(\frac{d_p}{d} \right)^{3/2} \qquad (14)$$

mit d_p = Partikeldurchmesser [m]
d = Filterkorndurchmesser [m]

Der Siebeffekt γ_S^* zeigt einen ähnlichen funktionellen Zusammenhang zwischen Einzelkollektorabscheidegrad und der Korngröße des Filterkorns und Partikels wie die Interception γ_I^*.

3. Arbeitsmethodik

Das schematische Diagramm der Abb. 4 zeigt den experimentellen Aufbau der Durchströmungsversuche mit einer Wasserdruckregeleinrichtung der Firma FHF Straßentest.

Die Probennahme der Bohrkerne ist mit einer handelsüblichen 650 Watt Bohrmaschine

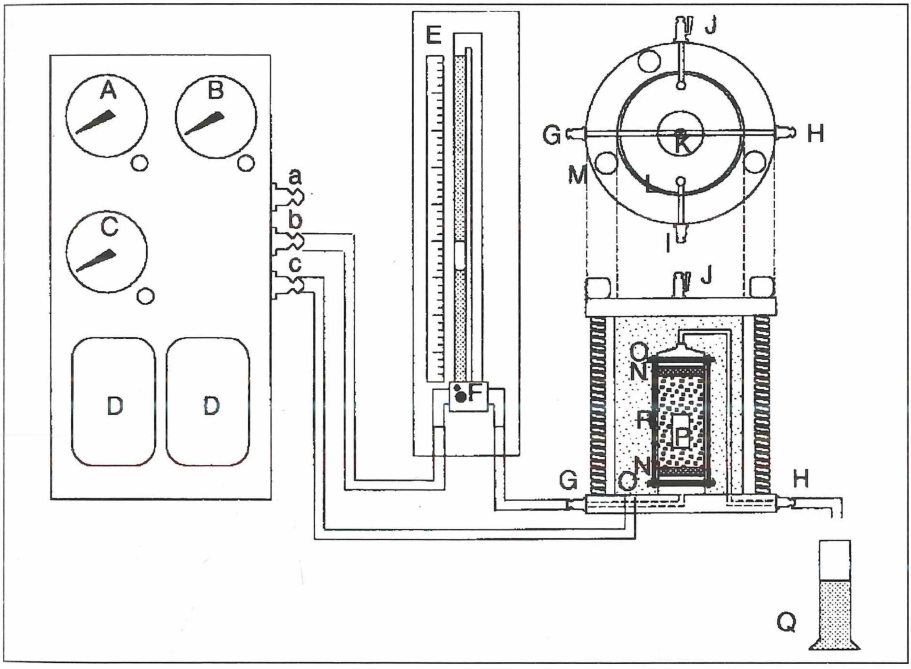


Abb. 4: Modellskizze des Labor-Permeameters (aus KNOKE, 1992)
A, B und C = Manometer mit Druckregler, a, b und c = Anschlüsse mit Schnellverschlußkupplungen, E = Volumenmeßgerät, F = Luftblaseninjektor, G = Probenzulauf, H = Porenwasserablauf, I = Zellenwasserzulauf, J = Zellenwasserablauf mit Hahn, L = Plexiglaszylinder, O = Dichtring, P = Probe, Q = Meßzylinder, R = Gummiummantelung

mit aufgesetzter 5cm Innendurchmesser aufweisender Stahlbohrkrone durchgeführt worden. Die gewonnenen zylindrischen Probenkörper sind zur Reinigung von Bohrmehl mit einer weichen Bürste gesäubert und danach mindestens vier Tage in einem Wasserbad zur Wassersättigung gelagert worden.

Die Proben zur Analyse der Kornsummenkurve wurden trocken gesiebt und petrographische Analysen mit einem Phillips-Röntgendiffraktometer PW 1361 durchgeführt. Zur Charakterisierung der Porenkanalgeometrie und des vernetzten Porenanteils der Festgesteinsproben wurden Wasserspannungskurven zur Ermittlung des Äquivalent-Porendurchmesser (HARTGE, 1964 und SCHOFIELD, 1905) aufgenommen. Weiterhin sind die in der Arbeit von BAUER (1994) verwendeten Dünnschliffe mit digitaler Bildanalysetechnik des unter Windows laufenden Programms DIAna, Version 1.0 (November 1993) der Firma BASys (Bildanalysesysteme) von Dr. J. Duyster auf die Porenverteilung und Porengeometrie untersucht worden. Die digitale Bildanalyse wurde auch zur Ermittlung der Feinstpartikelgrößen und deren Geometrie verwandt.

Da sowohl Analysen des rezenten Porenwassers als auch des Laborfluids vorlagen, bestand ein Interesse darin, mögliche Reaktionen des Fluids mit dem Festgestein abzuschätzen. Zur geochemischen Modellierung der Fluid-Festgestein-Interaktion wurde das Fortran IV Programm PHREEQE (**pH-re**dox-**eq**uilibrium-**e**quation) von D. L. Parkhurst, D. C. Thortenson & L. N. Plummer benutzt.

In der Modellierung der rezenten Porenwässer dieser Gesteine im Gleichgewicht mit den Mineralphasen Quarz und Feldspat wurde eine Temperaturerhöhung der Fluide und eine pH-Schwankung simuliert, um im besonderen die Varianz in der Sättigung gegenüber den beobachteten authigenen Mineralphasen zu dokumentieren.

Die Durchlässigkeitbeiwerte k_f sind an zylindrisch geschnittenen Probekörpern mit 5 cm Durchmesser und einer zwischen 7 und 12 cm schwankender Probenlänge an einem Labor-Permeameter mit konstanter Druckhöhe ermittelt worden. Um Randumläufigkeiten und Infiltration aus dem Ringraum der Druckzelle zu vermeiden, dienten Latex-Gummihüllen als Schutz der Probenkerne. Die Beaufschlagung der Druckzelle mit einem

Tab 1: Übersicht über angelegte Durchströmungsdrücke der verwendeten Proben („back" bedeutet Fließrichtungsumkehr)

Versuchsanfang **Versuchsende**

Innendruck:	0,4b	0,7b	1,0b	1,2b	2,0b	0,4b	0,4b back	1b back	1,5b back	1b back	1,5b back
Steinbruch Pfadfinder St. Georg											
P1, senkrecht		X				X					
P3,waagerecht		X				X					
P4,waagerecht		X	X								
Steinbruch Zeidler & Wimmel											
Z5, waagerecht	X	X									
Z7, waagerecht	X	X									
Z13, senkrecht				X	X						
Z14, senkrecht				X	X						
Steinbruch Müller											
M1, waagerecht		X				X	X	X	X		
M2, waagerecht	X	X				X	X	X	X	X	X

konstanten isotropen Zellinnendruck von 2,5 bar für alle durchgeführten Versuche geschah nach vollständiger Wasserflutung über eine Druckregeleinrichtung. Nach langsamer Bewässerung der Probe wurden die Kerne mit einem konstanten Wasserdruck von unten nach oben durchströmt.

Um die Anwendbarkeit der Darcy-Gleichung und des Kozeny-Carman-Ansatzes zu überprüfen, mußte für jeden angelegten Gradienten der Permeameter-Versuche die Reynolds-Zahl als Maß für den laminaren bzw. turbulenten Fluß berechnet werden.

Die Versuchsphase beinhaltete sowohl eine Variation des Durchströmungsdruckes über eine Druckregeleinrichtung als auch die teilweise Umkehr der Fließrichtung. Einen Aufschluß über die bei den einzelnen Kernen angelegten Durchströmungsdrücke und eventuelle Fließrichtungsumkehr gibt Tab. 1.

Die Probennahme für die Feinstpartikelanalyse erfolgte am Ausfluß nach Porenvolumen (PV) Eluat. Die Quantifizierung der Feinstpartikel in den Poreneluaten geschah mit einem Photometer der Firma Merck über Trübemessungen.

4. Ergebnisse

4.1 Festgesteinsparameter

Die Kornsummenkurven in Abb. 5 zeigen die aus der zweifachen Trockensiebung zusammengefaßten Korngrößenverteilungen der Materialien aus den drei Lokationen in semilogarithmischer Darstellung.

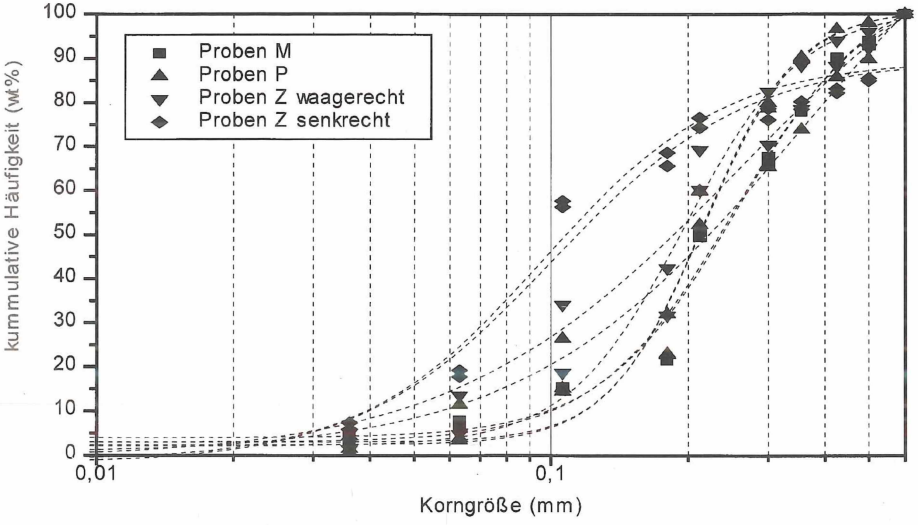


Abb. 5: Kornsummenkurven der bearbeiteten Proben aus dem Steinbruch „Müller", „Pfadfinder St. Georg" und „Zeidler & Wimmel"

Deutlich zeigt sich an den Kernen der drei Lokationen der Probennahme eine relativ gleichförmige Zusammensetzung des Probenmaterials. Auffallend sind jedoch die starken Unterschiede zwischen den senkrechten und waagerechten Probenkernen. Die senkrechten Proben besitzen einen signifikant erhöhten Anteil der Silt-Fraktion. Einzige Ausnahme bildet die waagerechte Probe Z5 aus dem Steinbruch Zeidler & Wimmel mit

einem ebenfalls erhöhten Silt-Anteil. Die anderen waagerechten Proben zeigen trotz ihrer unterschiedlichen Probenahmelokationen einen ähnlichen Verlauf der Korngrößenverteilung.

Auf Grund der Kornsummenkurve können die waagerechten Proben mit über 90 Massenprozent Sandanteil und 5-10 Massenprozent Siltanteil als schwach siltige Fein- bis Mittelsandsteine bezeichnet werden.

Die senkrechten Proben des Steinbruchs Zeidler & Wimmel (Z13 und Z14) können als siltige Feinsandsteine bezeichnet werden. Insgesamt zeigen alle bearbeiteten Proben eine schlechte Sortierung. Der Ungleichförmigkeitsgrad U ist bei allen Proben < 5 und schwankt zwischen 2,2 und 4,6, wobei kein eindeutiger Trend zwischen senkrechten und waagerechten Proben zu beobachten ist. Alle bearbeiteten Kerne können auf Grund des $U < 5$ als gleichförmige Sandsteine bezeichnet werden.

Die XRD-Analyse der mineralogischen Zusammensetzung der Gesamtgesteine zeigt einen Mineralbestand mit den Hauptgemengteilen aus Quarz und Feldspat sowie den Nebengemengteilen Muskovit, Illit, Kaolinit und Spuren von Chlorit. In den Proben des Steinbruchs Zeidler & Wimmel konnte als zusätzliches Mineral Jarosit identifiziert werden, ein Kalium-Eisen-Hydroxosulfat mit der stöchiometrischen Formel $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, wobei das Eisen u.a. durch Blei und Mangan substituiert werden kann. Eine Quantifizierung dieser mit der XRD gemachten qualitativen Analyse war nicht nötig, da quantitative Daten aus Dünnschliffauswertungen von BAUER (1994) vorlagen.

Die ermittelten Gesamtporositäten n und die Porenziffer e zeigen deutlich niedrigere Gesamtporositäten in den senkrechten Proben Z13 und Z14 als in den waagerechten Gesteinsproben und der senkrechten Probe P1, die in dieser Betrachtung eine Ausnahme bildet. Bis auf die Kerne M2 und Z7 liegen alle ermittelten Porositäten mit Berücksichtigung der Meßgenauigkeit unter dem Porositätswert von $n = 0{,}2595$ der dichtesten, 12er koordinierten rhomboedrischen Kugelpackung. Berücksichtigt man die Beziehung zwischen Gesamtporosität n und effektiver Porosität n_{eff} und multipliziert die ermittelten Gesamtporositäten mit einem Faktor von $\sim {}^2/_3$, so erhält man Werte von 10-18% ±1% als Maß für die effektive Porosität der Festgesteine.

Der Porenanteil der Kerne liegt zwischen dem Minimalwert 0,18 ± 0,01 für die senkrechten Proben Z13 und Z14 und 0,38 ± 0,01 für die Probe M2.

Die experimentell ermittelten Saugspannungskurven mit dem Äquivalent-Porendurchmesser nach HARTGE (1965) für die bearbeiteten Sandsteine sind in den Abb. 6 dargestellt und zeigen signifikante Unterschiede sowohl im Wassergehalt als auch im Verlauf der Saugspannungskurven im Vergleich zwischen senkrechten und waagerechten Proben einer Lokation auf. Bei einem Vergleich des mittleren Äquivalentdurchmessers, der als Porendurchmesser bei umgerechneten 50 Vol. –% Restwasser in dieser Arbeit definiert ist, zeigen die waagerechten Proben des Steinbruchs Müller einen mittleren Äquivalent-Porendurchmesser von 25-30 µm. Die waagerechten Proben des Steinbruchs Pfadfinder St. Georg weisen vergleichbare mittlere Äquivalent-Porendurchmesser von 25-32 µm auf. Bei Betrachtung der senkrechten Probe P1 zeigt sich deutlich eine Verschiebung des mittleren Äquivalent-Durchmessers zu niedrigeren Werten von ≈ 20 µm.

Eine stärker differenzierte Betrachtung verlangen die bearbeiteten Proben des Steinbruchs Zeidler & Wimmel, da bei diesen Proben nicht nur ein Unterschied zwischen den waagerechten und senkrechten Proben besteht, sondern auch deutliche Unterschiede unter den waagerechten Proben auftreten. Die Probe Z7 kann mit einem mittleren Äquivalent-Durchmesser von 25-30 µm mit den waagerechten Proben der anderen Probelokationen verglichen werden, während die waagerechte Probe Z5 einen deutlich niedrigeren mittleren Äquivalent-Porendurchmesser von 15-20 µm aufweist. Die senkrechten Proben des Steinbruchs Zeidler & Wimmel haben niedrigere mittlere Äquivalent-Porendurchmesser von ca. 10 µm.

Alle waagerechten Proben der drei Steinbrüche zeigen ≥ 90% grobe Poren mit einem Durchmesser ≥ 10 µm. Auch die senkrechte Probe des Steinbruchs Pfadfinder St. Georg

liegt in diesem Rahmen des Porendurchmessers, während die senkrechten Proben des Steinbruchs Zeidler & Wimmel einen Anteil von ≈ 50% Mittelporen mit einem Porendurchmesser von 0,2-10 µ besitzen. Auch die waagerechte Probe Z5 zeigt einen erhöhten Anteil an Mittelporen.

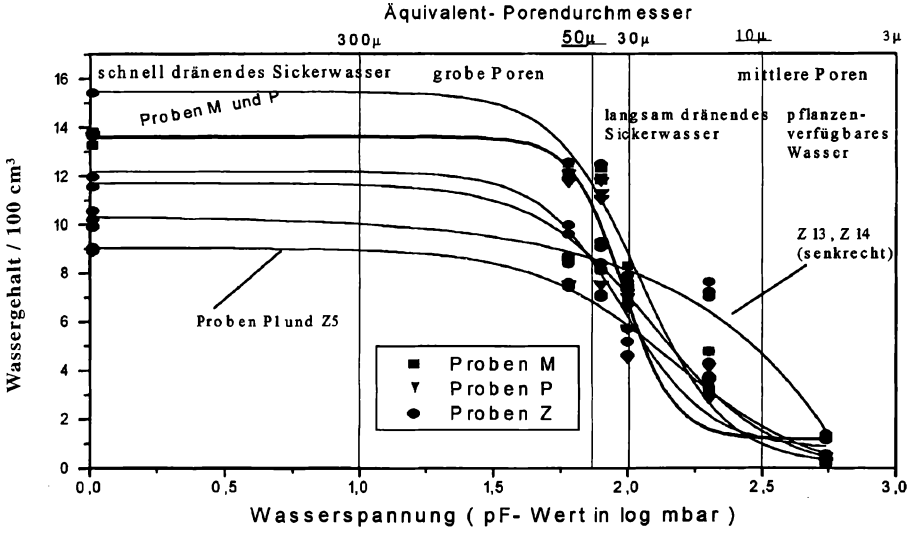


Abb. 6: Wasserspannungskurven der bearbeiteten Proben aus dem Steinbruch „Müller", „Pfadfinder St. Georg" und „Zeidler & Wimmel"

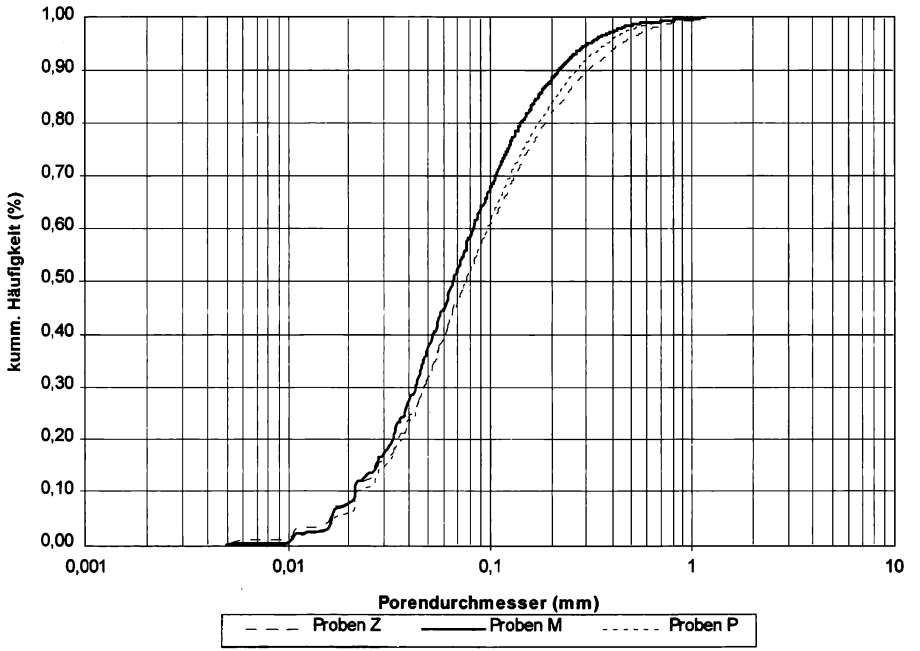


Abb. 7: Porensummenkurve der Dünnschliffe. Proben aus dem Steinbruch „Müller", „Pfadfinder St. Georg" und „Zeidler & Wimmel"

Die Porengrößenverteilung und die Geometrie der Porenräume konnte an Hand einer digitalen Bildanalyse von Dünnschliffen durchgeführt werden. Da die Dünnschliffe eine zufällige Schnittlage zur Schichtung repräsentieren (keine orientierte Probennahme), wird davon ausgegangen, daß sich die durch Schnitteffekte bedingten Fehler in etwa aufheben. In der Abb. 7 sind die Porensummenkurven der bearbeiteten Dünnschliffe der einzelnen Lokationen dargestellt. Die senkrechten und waagerechten Zählprofile der Porenräume von jedem Schliff sind als Summenkurve jeweils einzeln in die Abbildung eingetragen. Von den Steinbrüchen Müller und Pfadfinder St. Georg standen jeweils zwei Dünnschliffe zur Verfügung. Die Porensummenkurven der Dünnschliffe des Steinbruchs Müller zeigen eine starke Schwankung des mittleren Porendurchmessers, definiert als Porendurchmesser bei 50% kumulativer Häufigkeit der Porensummenkurve. Für die Gesteine des Steinbruchs Müller muß aus den bearbeiteten Dünnschliffen ein Bereich zwischen ungefähr 40 und 90 µm als Spannweite des mittleren Porendurchmessers angegeben werden. Aus den gemittelten mittleren Porendurchmessern der Summenkurven ergibt sich ein Porenradius r_p von ca. 65 µm. Der Steinbruch Pfadfinder St. Georg zeigt mittlere Porendurchmesser von 60 bis 80 µm (r_p = 64 µm) und der Dünnschliff aus dem Steinbruch Zeidler & Wimmel weist 70-80 µ (r_p = 76 µ) für den mittleren Porendurchmesser auf.

Zusätzlich zu der Auswertung der Porengröße konnte durch die Angabe des Quotienten aus der längsten und kürzesten Achse des einzelnen vermessenen Porenraums ein Maß für die Ellipsität der Poren definiert werden. Bei einem Wert der Ellipsität von 1 hätte der Porenraum eine ideale kreisförmige Symmetrie. Die Werte des Steinbruchs Müller schwanken für die Ellipsität zwischen 2,3 und 3,2, liegen im Steinbruch Pfadfinder St. Georg bei 2,2 bis 2,5 und im Steinbruch Zeidler & Wimmel bei 2,3 bis 2,4.

In den Abb. 8 und 9 ist für den Steinbruch Zeidler & Wimmel exemplarisch ein Eindruck der Porengeometrie und die Genauigkeit der digitalen Bildanalyse gegeben. Abb. 8 zeigt das Korngefüge im Dünnschliff mit angefärbten Porenräumen, die in Abb. 9 markiert und in dieser Form zur Berechnung des Porenraumes benutzt wurden.

4.2 Chemisch-Hydraulische Parameter

Das für die Labor-Permeameterversuche genutzte Leitungswasser des Mainzer Kalk-Tertiärs ist mit Grundwasseranalysen der Grundwassergewinnung Krumbachtal verglichen worden. Die Proben des Krumbachtales stellen rezente Aquifer-Porenwässer im Bereich der Unteren Karlstal- und Rehbergschichten dar.

Die chemischen Analysen des Laborfluids und der Proben des Krumbachtal sind in Tab. 2 dargestellt. Die Ionenstärke des Laborfluids liegt bei 0,015 mol/l gegenüber der Ionenstärke des rezenten Porenwassers von 0,0025 mol/l um etwa eine Größenordnung höher. Generell zeigt sich für das Laborfluid eine Dominanz der bivalenten Kationen Ca^{2+} und Mg^{2+}, sowie dem Hydrogenkarbonat (HCO_3) – als Anion. Die Analyse des rezenten Porenwassers des Krumbachtals zeigt ebenfalls eine Dominanz dieser Kationen und Anionen mit dem Unterschied, daß die Konzentrationen um ca. eine Größenordnung niedriger liegen .

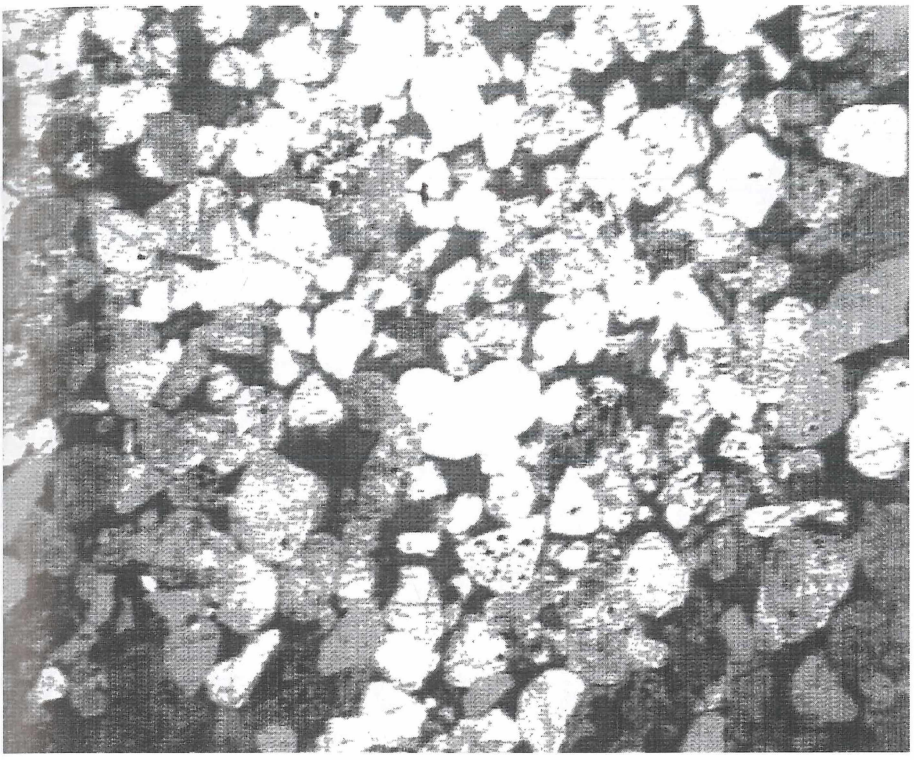


Abb. 8: RGB-Bild der digitalen Bildanalyse; Dünnschliff Zeidler & Wimmel

Tabelle 2: Gemittelte chemische Analysen der rezenten Porenwässer und des Laborfluids

Meßparameter:	Wasseranalyse Laborfluid	Wasseranalyse Krumbachtal
Temperatur:	21°C	12,8°C
pH-Wert:	7,49	6,8
Leitfähigkeit:	836,00 µS/cm	136,3 µS/cm
K^+ [mg/l]	2,29	2,4
Mg^{2+} [mg/l]	40,87	6,0
Mn^{2+} [mg/l]	0,01	0,06
Na^+ [mg/l]	28,47	5,0
Ca^{2+} [mg/l]	112,47	16,8
Si^{4+} [mg/l]	n.g.	9,8
$H(CO_3)^-$ [mg/l]	384,9	65,8
Cl^- [mg/l]	53,00	13,8
$(NO_3)^-$ [mg/l]	6,61	3,7
$(NO_2)^-$ [mg/l]	0,01	0,0
$(SO_4)^{2-}$ [mg/l]	111,67	5,8
$(PO_4)^{3-}$ [mg/l]	1,60	0,2

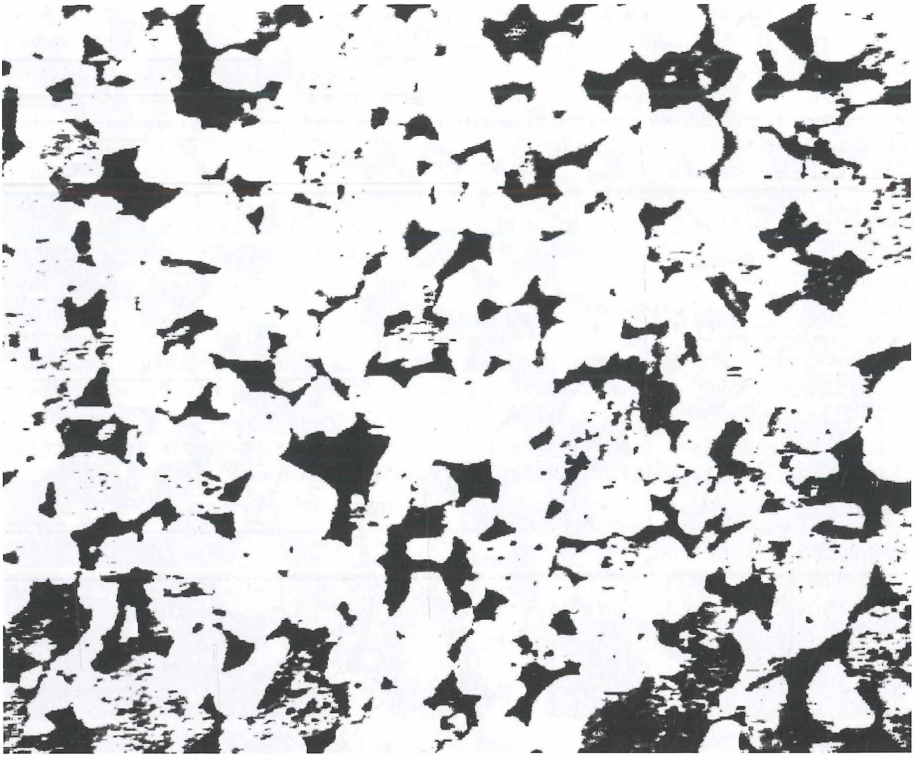


Abb. 9: Markierter Porenraum des RGB-Bildes zur Berechnung geometrischer Faktoren

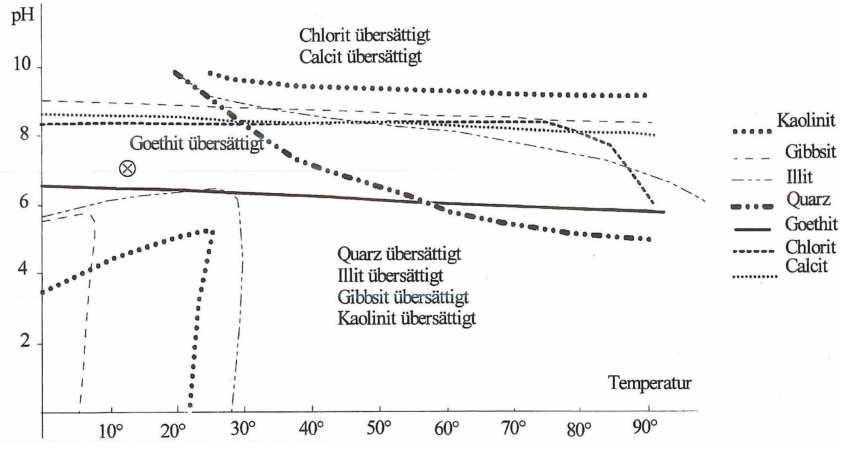


Abb. 10: Modellierung der Übersättigungsbereiche einzelner authigener Minerale mit rezenten Porenwässern (PHREEQE-Modellierung) ⊗ = darstellender Punkt der rezenten Porenwässer

Bei der bildanalytischen Auswertung der Dünnschliffe konnten im Porenraum deutliche authigene Mineralbildungen von Quarz, Feldspat, Fe-Oxiden, Illit, Kaolinit und Chlorit identifiziert werden, die von BAUER (1994) detailliert untersucht wurden. Eine Variation des pH-Wertes und der Temperatur der rezenten Porenwässer zeigt Bereiche der Übersättigung gegenüber einzelnen authigenen Mineralen (Abb. 10). Die authigenen Minerale Jarosit und Feldspat sind in diesem Diagramm nicht dargestellt, da die zur Simulation benutzten Porenwässer gegenüber diesen Mineralien im gesamten Modellierungsbereich eine Untersättigung zeigen. Eine Untersättigung der Porenlösung ist bei niedrigen Temperaturen und niedrigen bis mittleren pH-Werten gegenüber den Mineralen Kaolinit, Illit und Gibbsit gegeben. Eine Übersättigung der Lösung gegenüber Goethit ist bei neutralen bis basischen pH-Werten im gesamten Temperaturbereich vorhanden. Eine Übersättigung der Lösung gegenüber Calcit und Chlorit ist bei Temperaturen bis 80° C erst in basischen pH-Bereichen gegeben, sinkt aber für Chlorit bei Temperaturen über 80° C in neutrale pH-Bereiche ab.

Ein Vergleich der Speziesverteilung der rezenten Porenlösung zeigt eine Dominanz der Fe(II)-Spezies unter den Eisenverbindungen und der $[Al(OH)_4]$-Spezies unter den Aluminiumverbindungen.

Die Modellierung des Laborfluids mit dem Programm PHREEQE ergab eine Übersättigung der Lösung gegenüber den Mineralen Calcit, Gibbsit und Goethit bei gleichzeitiger Untersättigung der Lösung gegenüber Kaolinit und den anderen tonmineralischen authigenen Bildungen.

Bei den durchgeführten Permeabilitätsmessungen wurde mit einem hohen Druckgradienten gearbeitet, um Permeabilitätsschädigungen durch mobilisierte Feinstpartikel zu untersuchen. Einen exemplarischen Überblick über die Variation des Innendrucks und die dabei gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte der Probenkerne zeigen die folgenden Abbildungen 11 und 12. Aus einem Vergleich der bearbeiteten senkrechten und waagerechten Probenkerne zeigt sich deutlich eine richtungsabhängige Permeabilität bzw. ein Durchlässigkeitsbeiwert.

Vergleichbare maximale Durchlässigkeitsbeiwerte zeigen die waagerecht erbohrten ± parallel zur Schichtung der Schrägschichtungskörper laufenden Kerne von 1-3,5 · 10^{-6} m/s. Einzige Ausnahme in dieser Betrachtung bildet der Kern Z5 aus dem Steinbruch Zeidler & Wimmel, der einen deutlich niedrigeren maximalen k_f-Wert von ca. 3 · 10^{-7} m/s aufweist.

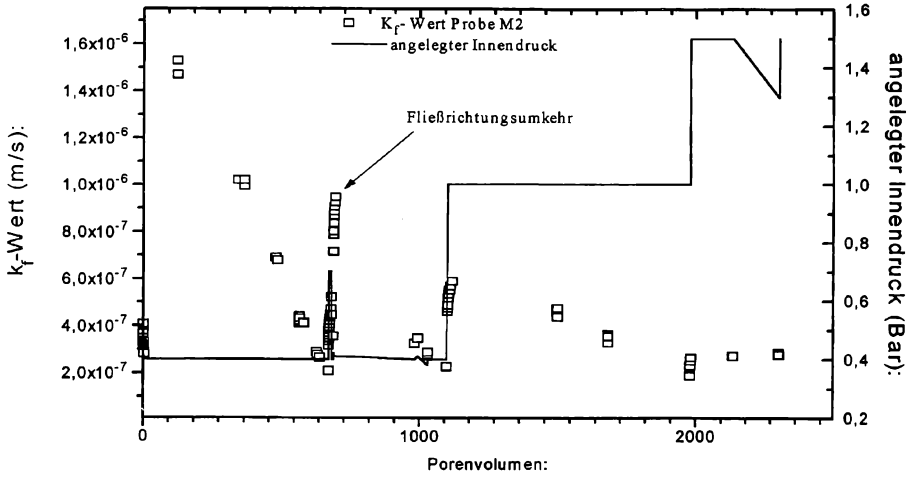


Abb. 11: Permeameter-Versuch der Probe M2

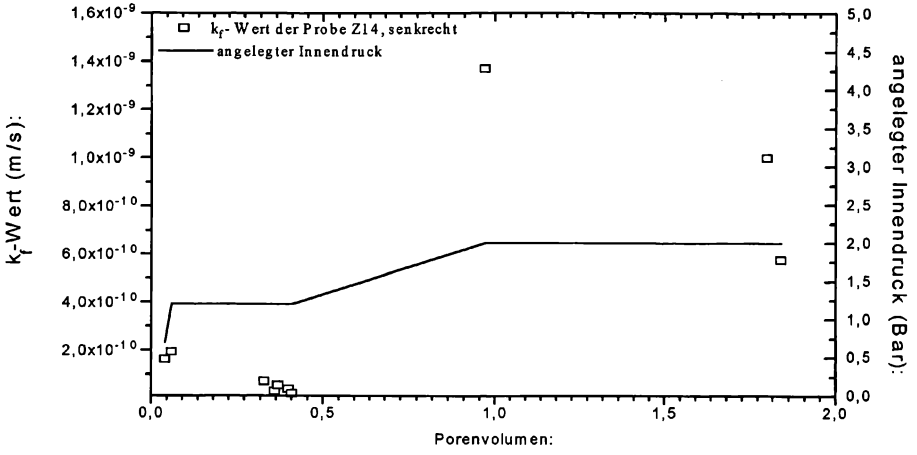


Abb. 12: Permeameter-Versuch der Probe Z14

Die senkrecht zur Schichtung gebohrten Probenkerne ergeben um zwei Zehnerpotenzen niedrigere k_f-Werte mit ca. $2 \cdot 10^{-8}$ in der Probe P1 und ungefähr $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ in den senkrechten Proben Z13 und Z14. Permeabilitätsschädigungen konnten in den Proben M1, M2, P3, P4 und andeutungsweise in Z7 bei unterschiedlichen Druckgradienten nachvollzogen werden. Es zeigt sich deutlich im Initialbereich der Durchströmung bei allen beobachteten Permeabilitätsschädigungen eine asymptotische Näherung zu einem Endwert der Permeabilität und ein Verlauf der Kurve in Form einer Kinetik erster Ordnung. Die im weiteren Verlauf der Versuche beobachteten Permeabilitätsschädigungen zeigen einen flachen linearen bzw. flach asymptotischen Verlauf, der bei diesen geringen negativen Steigungen nicht mehr zu differenzieren ist.

Eine gute Dokumentation des Übergangs vom steilen asymptotischen in der Initialphase in den flachen eher linearen Verlauf der Permeabilitätsschädigung geben die Meßpunkte der Probe P4, die exemplarisch für den Verlauf der Permeabilitätsschädigung in Abb. 13 dargestellt ist.

Die Umkehr der Fließrichtung in den Proben M1 und M2 bewirkte einen Sprung des Durchlässigkeitsbeiwertes auf 25% bzw. 62% des ermittelten Maximalwertes. Die schlagartige Erhöhung des Druckgradienten über die Druckregeleinrichtung des Labor-Permeameters von 0,4b auf 0,7b bei den Proben M1 und M2 zeigte ebenfalls eine Verbesserung der Permeabilität, die jedoch im Vergleich zur Fließrichtungsumkehr nicht die Effizienz der Permeabilitätsrückgewinnung zeigte (10-30%). Ein simuliertes Stagnieren des Porenwassers durch vorübergehendes Abschalten des angelegten hydraulischen Gradienten bei permeabilitätsgeschädigten Proben zeigte ebenfalls eine Verbesserung der Permeabilität des Gesteins. Bei Probe P4 aus dem Steinbruch Pfadfinder St. Georg konnte auf diese Weise eine Erhöhung des Durchlässigkeitsbeiwertes um ca. 50 % erzielt werden.

Die Definition des finiten Durchlässigkeitsbeiwertes ist im Rahmen der Versuchszeit nicht exakt bestimmbar und muß daher bei einigen Versuchen interpoliert werden, wobei diese Interpolation bei flachem Kurvenverlauf nur mit sehr großen Fehlern durchzuführen ist.

Die Berechnung der Reynolds-Zahl wurde nach MATTHESS & UBELL (1983) durchgeführt. Die Reynolds-Zahl variiert generell zwischen 0,08 und 16,8 für alle durchgeführten Permeameterversuche. Dabei wird in den senkrecht zur Schichtung erbohrten Probenkernen die Grenze zwischen laminarem und turbulentem Fluß nie erreicht und die

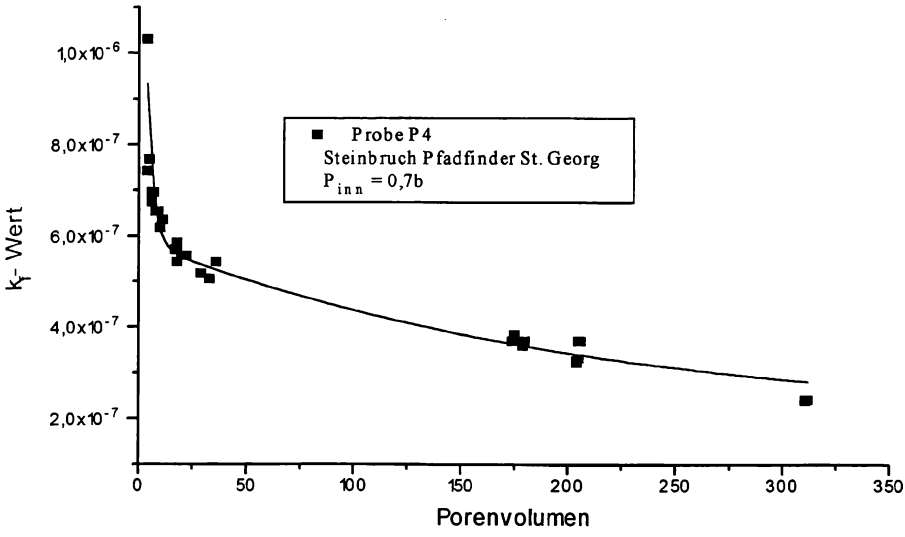


Abb. 13: Verlauf der Permeabilitätsreduktion in Probe P4

Reynolds-Zahlen liegen immer im Wertebereich < 10. Bei den waagerechten Probenkernen wird die Grenze Re =10 des Übergangs zum turbulenten Fluß etwa bei einem angelegten Innendruck von 1b (10m Wassersäule) erreicht.

4.3 Feinstpartikelanalytik

Eine quantitative Auswertung der mobilisierten Feinstpartikel konnte nicht durchgeführt werden, da alle Meßwerte unterhalb des Meßbereichs des benutzten Photometers lagen. Jedoch geben die ermittelten Daten eine semiquantitative Auskunft über das Verhältnis der ausgetragenen Menge an Feinstpartikeln pro Porenvolumen. Die Abb. 14 zeigt eindeutig eine Abnahme der mobilisierten Menge an Feinstpartikeln vom 1. zum 3. Porenvolumen (PV) einer Probe. Die Tendenz einer erhöhten mobilisierten Feinstpartikelmenge bei höherem Innendruck ist aus den Meßwerten der analysierten Poreneluate nicht festzustellen.

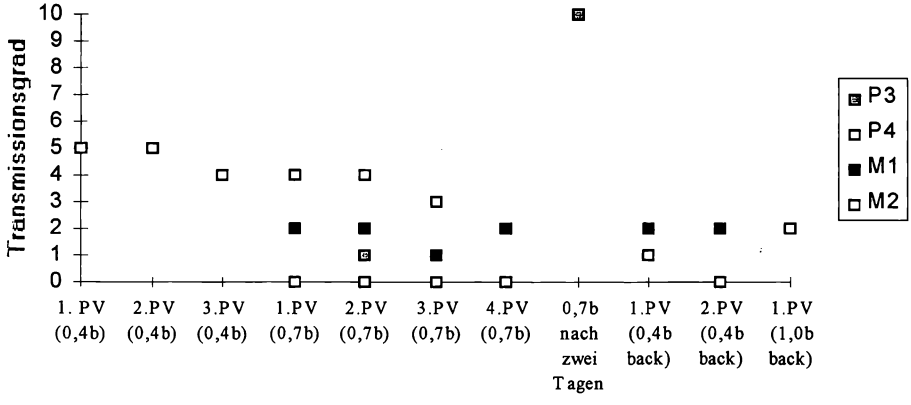


Abb. 14: Transmissionsgrad als Maß für die ausgetragene Feinstpartikelmenge einzelner Porenvolumen

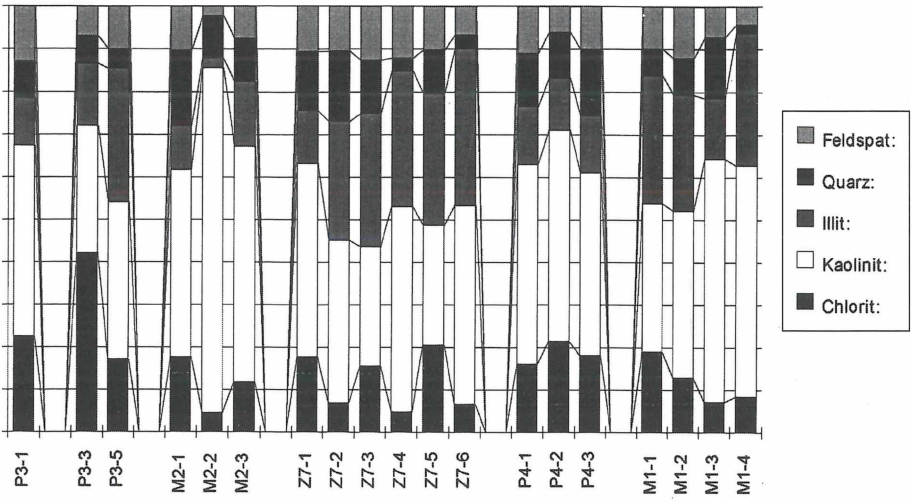


Abb. 15: Semiquantitative Auswertung der Mineralogie der Poreneluate aus XRD-Diagrammen

Bei Umkehr der Fließrichtung (mit „back" gekennzeichnet) ist eine Erhöhung des mobilisierten Feinstanteils in den Poreneluaten feststellbar, die jedoch nicht die Signifikanz der Erhöhung des Feinstanteils durch Stagnation des Porenwassers (mit „nach zwei Tagen" gekennzeichnet) im Poreneluat erreicht.

Eine qualitative Erfassung der Mineralogie der Poreneluate mit der XRD konnte durchgeführt werden, jedoch bereitete die semiquantitative Auswertung der Meßdaten auf Grund der geringen Probenmenge und der geringen Intensitäten große Probleme. Mineralogisch konnten die Minerale Kaolinit, Illit, Chlorit, Feldspat und Quarz identifiziert werden. Eine Quantifizierung der einzelnen Minerale erfolgte über die Peakhöhenverhältnisse der einzelnen Minerale in der Texturprobe (BISCAYE, 1965), die mit sehr hohen Fehlern behaftet ist, so daß in Abb. 15 keine prozentualen Angaben über die Anteile einzelner Mineralfraktionen gemacht werden.

Die semiquantitative Auswertung der einzelnen Poreneluate ergibt in allen drei Lokationen der Probennahme eine eindeutige Dominanz von Kaolinit in der mineralogischen Zusammensetzung. In der Abfolge der Quantität folgen Illit, Chlorit, Feldspat und Quarz.

Quellfähige Tonminerale (z.B. K-Montmorillonit) konnten weder in den Poreneluaten noch in den Gesamtgesteinsanalysen identifiziert werden.

Zur Dokumentation der Ergebnisse der verwendeten Analysenmethode der digitalen Bildanalyse sind in der folgenden Abb. 16 die Feinstpartikel-Summenkurven der einzelnen Poreneluate des Kerns M1 dargestellt.

Die Kornsummenkurven der einzelnen Poreneluate aller Proben zeigen, daß ≥ 95% der Feinstpartikel im Eluat eine Korngröße kleiner 20 µm besitzen. Ein Vergleich der d_{50} (Schnittpunkt der Kornsummenkurve bei 50% kumulativer Häufigkeit) der verschiedenen Kerne zeigt keine wesentlichen Unterschiede und liegt für die Proben aus dem Steinbruch Müller bei 2-3 µm, während im Steinbruch Pfadfinder St. Georg in Probe P3 1-2 µm und in Probe P4 1,5-3,5 µm gemessen wurden. Die mobilisierten Feinstpartikel des Steinbruch Zeidler & Wimmel liegen mit 1,5-2 µ für d_{50} auch in diesem Rahmen.

Die Änderung der Korngrößenverteilung über die einzelnen Porenvolumen-Eluate läßt an Hand der für diese Arbeit analysierten Proben keine allgemeingültigen Schlüsse zu, jedoch sollen an dieser Stelle beobachtete Tendenzen erwähnt werden. In den meisten analysierten Poreneluaten ist eine Kornverkleinerung vom 1. zum 3. PV zu beobachten. (Probe M1, M2 und P4) Die Kornsummenkurven dieser Proben zeigen mehr oder weniger eine Verschiebung in Richtung der Abszisse. Die Änderung der Korngrößenverteilung der Porenvolumen der Probe P3 zeigt nicht nur eine Verschiebung der Kornsummenkurve in Richtung der Abszisse, sondern die Kornsummenkurven werden zusätzlich flacher in ihrem Verlauf. Dies bedeutet, daß der Unförmigkeitsgrad U in diesen Proben zunimmt.

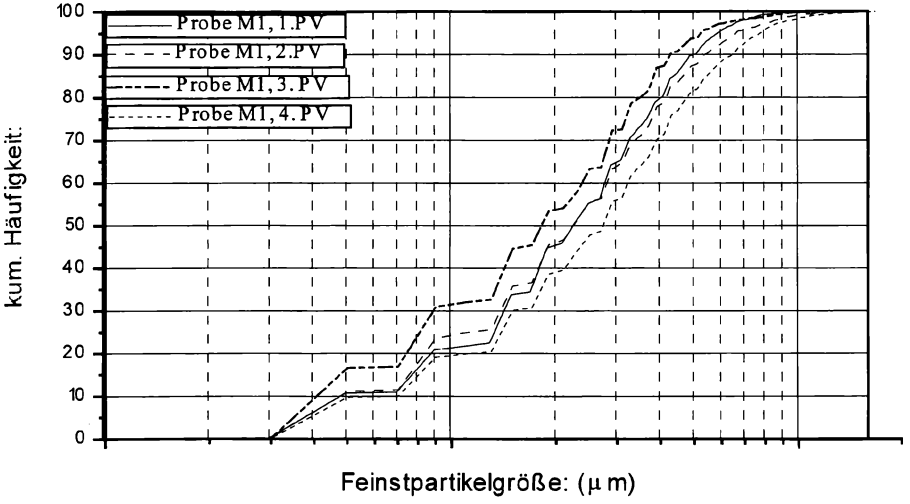


Abb. 16: Kornsummenkurven der einzelnen Porenvolumen der Probe M1

Die Werte der mittleren Korngrößen der Poreneluate, die Ellipsität, die Oberflächenrauhigkeit (PARIS) der Partikel sowie der gemessene maximale Durchlässigkeitsbeiwert sind in Tab. 3 angeführt. Die Ellipsität als Maß der Abweichung der Kornform von der Idealgestalt eines Kreises läßt eine Zunahme mit kumulativem Poreneluat erkennen. In den Fällen, in denen die Ellipsität mit kumulativem Poreneluat abnimmt, steigt die Oberflächenrauhigkeit (PARIS) der analysierten Feinstpartikel.

Die durch den Porenraum der einzelnen Probenkerne transportierte Partikelgröße zeigt geringste Werte von ca. 2-4 µm aus den Kernen M1 und M2 des Steinbruchs Müller, ca. 2-6 µm aus den Kernen P3 und P4 des Steinbruchs Pfadfinder St. Georg und ca. 3-5 µm im Kern Z7 des Steinbruchs Zeidler & Wimmel.

Tab. 3: Analysierte Parameter der digitalen Bildanalyse mit maximalen Durchlässigkeitsbeiwert

Probe:	∅ Korngrößen: [µm]	Ellipsität:	Paris:	max k_f
M1-1	2,7	2,89	1,04	2,01E-07
M1-2	2,81	3,19	1,05	1,99E-07
M1-3	2,31	3,54	1,03	1,92E-07
M1-4	3,25	3,1	1,06	2,20E-07
M2-1	2,4	3,81	1,04	4,07E-07
M2-2	3,72	2,87	1,09	3,19E-07
M2-3	2,28	3,52	1,03	2,95E-07
P3-1	2,38	3,32	1,05	1,24E-07
P3-2	2,86	2,87	1,05	8,60E-07
P3-3	3,07	2,96	1,07	7,74E-07
P3-5	4,22	3,05	1,09	1,24E-06
P4-1	5,35	2,5	1,12	6,99E-08
P4-2	5,16	3,14	1,1	3,43E-08
P4-3	2,15	3,55	1,03	3,02E-08
Z7-1	3,6	2,89	1,08	3,00E-07
Z7-2	3,79	2,9	1,09	4,27E-07
Z7-3	4,47	2,91	1,11	4,31E-07

5. Interpretation und Diskussion

5.1 Festgesteinsparameter

In allen drei Lokationen konnten in den fluviatil geschütteten Schrägschichtungskörpern vereinzelt Tonlinsen bzw. Flatschen entdeckt werden, die auf einen geringen Transportweg der Sedimente hinweisen und die experimentell beobachtete schlechte Sortierung erklären. Auch die Abweichung der Kornsummenkurve der senkrechten Proben mit einem erhöhten Silt- und Feinsandanteil kann durch die Feldbeobachtungen erklärt werden. Die circa senkrecht zur Schichtung erbohrten Festgesteinsproben zeigen sowohl Ablagerungen eines höheren Fließregimes (sandige Partien) als auch Ablagerungen niederen Fließregimes (Silt und Feinsand), sowie Tonlinsen. Daher ist der Silt- und Feinsandanteil in den senkrechten Proben erhöht und die waagerechten Proben, die im Idealfall parallel der Schichtung erbohrt sind, weisen die Dominanz einer Korngröße auf.

Die Folge dieser Beobachtung sollte eine Erhöhung des Ungleichförmigkeitsgrades in den senkrechten Proben sein, die sich aber in dieser Form nur in der Probe P1 bestätigt. Generell sind alle Proben mit einem Ungleichförmigkeitsgrad < 6 als gleichförmig zu bezeichnen (DIN 18196, 1988) und lassen vermuten, daß die Hydraulik des Ablagerungsmilieus keinen starken Schwankungen unterworfen war.

Eine sedimentologische Interpretation der Sortierung und anderer Parameter dieser Kornsummenkurven soll in dem Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt werden.

Die beobachtete starke Richtungsabhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes läßt sich an Hand der hier gemachten Aussagen einfach erklären, denn laminare Bereiche geringer Korngrößen (Ton-Silt-Fraktion) bzw. eingelagerte Tonlinsen bilden in den senkrechten Proben eine Art Aquiclude, so daß nur geringe Durchlässigkeiten im Vergleich zu den waagerechten Proben zu erwarten sind.

Aufgrund der geringen Ungleichförmigkeitsgrade sind die relativ hohen Porositätswerte der Festgesteinsproben durchaus plausibel, denn die Ausfüllung der Porenräume mit kleineren Korngrößen ist nur unzureichend gewährleistet. Deutlich zeigen sich bessere räumliche Ausfüllungen der Porenräume in Proben mit höherem Siltanteil, so daß folgerichtig die senkrechten Proben P1, Z13 und Z14, sowie die waagerechte Probe Z5 die niedrigsten Porositätswerte besitzen. Die ermittelten Porenziffern e der bearbeiteten Proben sind mit analysierten Werten von 0,21-0,35 an Festgesteinsproben der Solling-Folge nordöstlich von Eschwege aus der Arbeit von KNOKE (1992) vergleichbar.

Das Ergebnis der Saugspannungskurven im Vergleich zur digitalen Bildanalyse der Porenräume zeigt, wie in dem Kapitel 4.1 dargestellt ist, eine große Differenz zwischen den ermittelten mittleren Äquivalent-Durchmessern (ca. 15-32 µm) und den mit der Bildanalyse gewonnenen mittleren Porendurchmessern (40-90 µm). Die Auswertung der Saugspannungskurven zeigt deutliche Unterschiede der Kerne einer Probelokation auf und gibt genauere Informationen über den hydraulisch wirksamen Porengrößenbereich des Gesteins. Aus der Auswertung der Wasserspannungskurven der Abb. 6 wird dabei deutlich, daß alle senkrechten Proben der drei Steinbrüche ≥ 90% grobe Poren mit einem Durchmesser ≥ 10 µm (langsam und schnell dränendes Sickerwasser nach HARTGE, 1965) aufweisen. Der Anteil an schnell dränenden Grobporen hat im Zuge der Kompaktion der Sandsteine während der Diagenese und der Bildung authigener Minerale im Vergleich zu Lockersedimenten dieser Korngröße deutlich abgenommen und es werden nur ca. 20 Vol.% des Gesamtwassergehaltes aus diesem Porengrößenbereich entwässert. Ähnliches gilt für den Bereich der mittleren Poren, da nach Auswertung der Saugspannungskurven nur ein Anteil von ca. 10 Vol.% des Wassergehaltes aus diesem Porengrößenbereich entdränt wird, während aus den langsam dränenden groben Poren im Bereich von 10-50 µm ca. 70 Vol.% des Wassergehaltes entwässert werden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, daß zur Dränage von 20 Vol.% Wasser aus dem Grobporenbereich nur einige wenige Poren vorhanden sein müssen, während zur Dränage von 10 Vol.% Wasser aus den mittleren Poren eine sehr viel höhere Zahl an Mittelporen benötigt wird.

Die Kompaktion und Diagenese der Sandsteine führte bei den bearbeiteten Proben zu einer merklichen Reduktion des vernetzten dränbaren Grobporengrößenspektrums, das für diese kompaktierten Gesteine heute deutlich in dem begrenzten Bereich von 10-50 µm liegt.

Die gewonnenen geometrischen Werte der Ellipsität der Porenräume aus den Daten der digitalen Bildanalyse lassen auf ein Verhältnis von 2:1 bis 3:1 der Porenachsen schließen. An Hand dieser Beobachtung wird deutlich, daß die Annahme kreiszylindrischer Poren zur Anwendung der Formel der Kapillarität bei kompaktierten Sedimenten bei der Angabe eines Äquivalent-Porendurchmessers mit sehr viel höheren Fehlern als bei Lockersedimenten verbunden ist. Der kombinierte Prozeß der Diagenese und Authigenese mit möglicher Lösung einzelner Minerale führte zu einer Auslängung der Porenräume der bearbeiteten Proben.

Das Ergebnis der Porengrößenverteilung verdeutlicht das große Problem der digitalen Bildanalyse, denn durch eine zweidimensionale Dünnschliffauswertung kann eine Porengrößenverteilung im Sediment bzw. Festgestein sehr gut ausgewertet und definiert werden, jedoch enthält diese Information keine Aussage über die dreidimensionale Vernetzung der Porenräume und den vom Fluid tatsächlich zu durchströmenden Porenbereich. Vorteil der bildanalytischen Auswertung ist jedoch eine Information über die Geometrie des Porenraums.

Eine weitere wichtige Rolle bei der Auswertung der Porengrößenverteilung in anisotropen Sedimenten spielt der Schnittwinkel des Dünnschliffes. Die in den bearbeiteten Proben angeschnittenen Schrägschichtungskörper können auch bei zufälliger Schnittlage nicht zwingend eine repräsentative Porengrößenverteilung ergeben, da die zufällig gewählte Bank möglicherweise nicht die typische Korngrößenverteilung dieses Aufschlusses besitzt.

5.2 Chemisch-Hydraulische Parameter

Die Daten der PHREEQE-Analyse der rezenten Porenwässer und des Laborfluids zeigen eine Über- bzw. Untersättigung einzelner authigener Mineralphasen gegenüber den Fluiden (Abb. 10).

Für die Berechnung des Redoxpotentials nach der NERST-Gleichung wurde davon ausgegangen, daß der im Porenwasser analysierte Eisengehalt in der Spezies des zweiwertigen Eisens vorliegt. Bestätigt wird diese Annahme durch den darstellenden Punkt der rezenten Porenwässer, der in das Stabilitätsfeld der Fe(II)-Spezies zu liegen kommt und die Speziesverteilung der PHREEQE-Modellierung.

Die Kinetik der Bildung bzw. Auflösung fester Phasen hängt von Oberflächenstruktur, Transportprozessen und den elektrostatischen und chemischen Wechselwirkungen an der Partikel-Fluidgrenzfläche mit gelösten Substanzen ab.

Für die Übersättigungen der authigenen Mineralphasen im Aquifer bilden die bereits vorhandenen radialstrahligen bis porenüberbrückenden authigenen Aggregate gleicher mineralogischer Zusammensetzung einen Katalysator hoher Oberfläche, so daß nach der Theorie geringe Übersättigungsgrade zur Bildung bzw. dem Wachstum dieser Minerale ausreichen und zu weiterer Permeabilitätsreduktion führen können. Aus den ermittelten Daten der Simulation kann aber nur eine Aussage über die potentielle Möglichkeit einer Mineralbildung von Quarz, Illit, Gibbsit, Kaolinit und Goethit bzw. eines Wachstums unter den rezenten Aquiferbedingungen gemacht werden, eine Bildung bzw. eine Bildungsrate kann nicht angegeben werden. Die gleiche Aussage gilt für die Untersättigung von Chlorit im rezenten Aquifersystem.

Für die Laborfluide konnte nur eine Übersättigung des Minerals Calcit festgestellt werden. Eine Bildung von Calcit mit dadurch induzierter Permeabilitätsschädigung kann jedoch an Hand der fehlenden Permeabilitätsschädigung in einigen Versuchen ausgeschlossen werden, da bei konstantem Chemismus des Fluids eine durch Calcit-Kristallwachstum bedingte Permeabilitätsschädigung in allen Probenkernen hätte auftreten müssen.

In der Tab. 4 ist ein Vergleich zwischen den nach der Formel von HAZEN (1892), ZIESCHANG (1961) und BEYER (1964) berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten für Lockersedimente mit den maximalen im Labor gemessenen k_f-Werten der einzelnen Proben aufgeführt. Es soll an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die Berechnungen des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f aus der Kornsummenkurve im engen Sinne nur für Lockersedimente gelten. In allen senkrechten Proben (P1, Z13, Z14) zeigt sich ein starke Differenz von zwei bis vier Größenordnungen zwischen den im Labor ermittelten und mit Hilfe der sedimentologischen Ansätze errechneten Werte des Durchlässigkeitsbeiwertes. Auch für die waagerechten Proben mit ± homogen, isotropen Material sind deutliche Unterschiede zu sehen. Die einfachen Berechnungen nach HAZEN (1892) und ZIESCHANG (1961) unter Vernachlässigung des funktionellen Zusammenhanges zwischen d_{10}-Wert und Unförmigkeit U zeigen dabei größere Abweichungen vom realen Wert als der berechnete Durchlässigkeitsbeiwert nach BEYER (1964). Für eine näherungsweise Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes der bearbeiteten waagerecht gebohrten Festgesteinsproben kann die Berechnung nach BEYER (1964) unter Kenntnis der Korngrößenverteilung verwendet werden. Aus dem Vergleich der nach BEYER (1964) berechneten und experimentell ermittelten waagerechten Durchlässigkeitsbeiwerte kann aufgrund der relativ geringen Abweichung der Ergebnisse eine minimale Permeabilitätsreduktion durch Diageneseprozesse geschlossen werden.

Die beobachteten, um ca. zwei Zehnerpotenzen niedrigeren senkrechten Durchlässigkeitbeiwerte stimmen in etwa mit Beobachtungen von LANGGUTH & VOIGT (1980) überein, die in der Regel von einem um eine Zehnerpotenz niedrigeren resultierenden vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert gegenüber dem horizontalen Durchlässigkeitsbeiwert bzw. der Permeabilität ausgehen. Die resultierende vertikale Durchlässigkeit ist dabei hauptsächlich von der in der Probe vorkommenden geringsten Durchlässigkeit abhängig. Aus diesem Zusammenhang läßt sich die große Abweichung der berechneten von den experimentell bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerten erklären, denn für die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes wurde die aus einer repräsentativen Probenmenge ermittelte Kornsummenkurve verwendet, die alle Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit umfaßt. Sinnvoll wäre jedoch eine separate Kornsummenkurve der Schicht geringster Durchlässigkeit zur Bestimmung des wirksamen Korndurchmessers für die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes der senkrechten Proben.

Tab. 4: Vergleich der berechneten und im Labor ermittelten kf-Werte der bearbeiteten Proben

Probe:	HAZAN	ZIESCHANG	BEYER	k_f-Wert gemessen
P1	3,77E-05	3,02E-05	1,75E-06	1,20E-08
P3	1,22E-04	9,79E-05	6,89E-06	1,20E-06
P4	9,65E-05	7,74E-05	5,12E-06	1,60E-06
Z5	3,77E-05	3,02E-05	1,75E-06	2,80E-07
Z7	9,65E-05	7,74E-05	5,31E-06	2,00E-06
Z13	2,41E-05	1,93E-05	1,26E-06	1,50E-09
Z14	2,41E-05	1,93E-05	1,23E-06	1,30E-09
M1	7,39E-05	5,92E-05	3,68E-06	1,10E-06
M2	7,39E-05	5,92E-05	3,58E-06	2,10E-06

Aus den berechneten Werten der Reynolds-Zahlen läßt sich erkennen, daß für fast alle angelegten Gradienten das Kriterium des laminaren Flusses mit einer Reynolds-Zahl ≤ 10 erfüllt ist. Bei einem angelegten Durchströmungsdruck von ca. 1 bar (10 m Wassersäule) wurde jedoch in den Laborversuchen dieses Kriterium des laminaren Flusses überschritten und nach der Definition müßte eine turbulente Strömung in dem als Rohrleitung aufgefaßten Porenkanal vorliegen. Für die turbulente Strömung wurde dieses Kriterium des laminaren Flusses überschritten und nach der Definition müßte eine turbulente Strömung in dem als Rohrleitung aufgefaßten Porenkanal vorliegen. Für die turbulente Strömung kommt es bei einer Gradientenerhöhung zu einer Permeabilitätsreduktion aufgrund steigender Trägheitskräfte, die allerdings bei den durchgeführten Versuchen nicht festgestellt werden konnte. Im Gegenteil dazu zeigt z.B. die Probe M1 bei einer Reynolds-Zahl Re = 16,8 und einem angelegten Innendruck von 1,5 bar eine Durchlässigkeitsbeiwerts-Erhöhung. Für die durchgeführten Laborversuche kann daher in erster Näherung angenommen werden, daß ein laminarer Fluß und die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes und der Kozeny-Carman-Gleichung vorliegt.

5.3 Feinstpartikelanalytik

Aus den Ergebnissen der bildanalytischen Auswertung der Porenräume und der Auswertung der Saugspannungskurven der bearbeiteten Gesteinsproben läßt sich eine limitierende Größe von ca. 70-80 µm für transportierte Partikel im Porenraum definieren.

Die bildanalytische Auswertung der Feinstpartikel zeigte eine Schwankung der mittleren Feinstpartikelgröße in den Poreneluaten mit einer Tendenz der Partikelgrößenabnahme vom 1. zum 3. Porenvolumen in den Proben M1, M2 und P4 und einer Partikelgrößenzunahme in den Kernen P3 und Z7. Der Vergleich des mittleren Feinstpartikeldurchmessers mit dem beim Abfüllen des Porenvolumens gemessenen maximalen Durchlässigkeitsbeiwert weist eine Zunahme des Feinstpartikelradius bei Zunahme des k_f-Wertes als Maß für die Transportkraft auf, wobei die Steigung dieser Regressionsgeraden Probenkern-spezifisch erscheint.

Zur Verdeutlichung der in Tab. 3 angeführten Meßergebnisse ist in Abb. 17 der ermittelten mittleren Feinstpartikeldurchmesser der einzelnen Poreneluate gegen den beim Abfüllen des Porenvolumens gemessenen maximalen Durchlässigkeitsbeiwert aufgetragen.

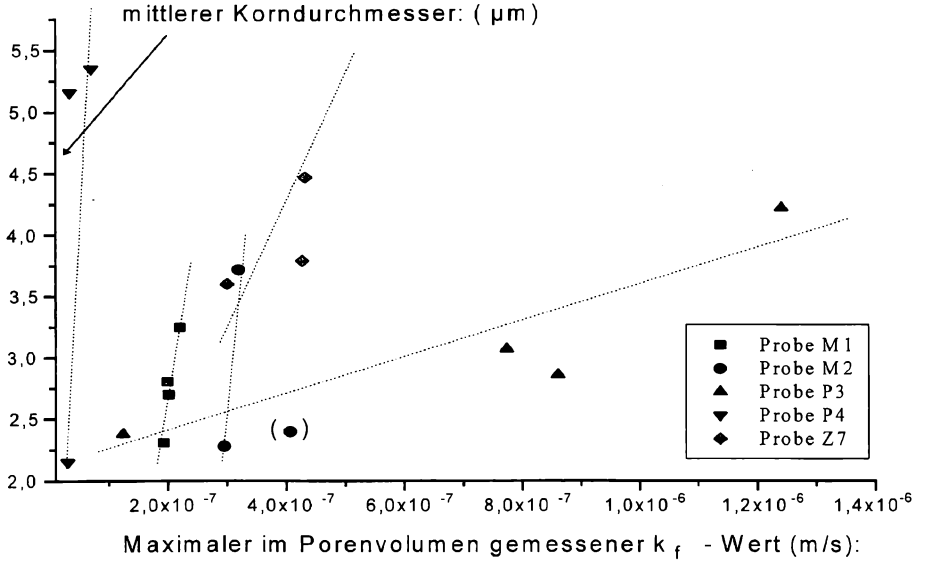


Abb. 17: Verhalten des mittleren Feinstpartikelradius mit steigender Transportkraft, ausgedrückt durch den maximalen k_f-Wert des abgefüllten Porenvolumens

Es zeigt sich ein aufgrund der geringen Anzahl an Meßpunkten ein vermuteter linearer Zusammenhang zwischen mittlerem Feinstpartikelradius und der Transportkraft bzw. k_f-Wert. Für die Probenkerne M1, M2 und P4 ergibt sich eine sehr steile Regressionsgerade der Probenpunkte, so daß hier möglicherweise auch eine Unabhängigkeit des mittleren Partikelradius von der Transportkraft vorliegt. Viel eher ist es aber eine Abhängigkeit von der Verfügbarkeit zu mobilisierender Feinstpartikelkorngrößen. Einzig die Probe P3 läßt einen solchen Zusammenhang vermuten.

Die mittlere Größe der transportierten Feinstpartikel zeigt bei Proben einer Lokation extreme Unterschiede, wie an dem Vergleich der Proben der Kerne P3 und P4 ersichtlich ist. Diese Unterschiede können nicht auf geometrische Eigenschaften des hydraulisch wirksamen Porenraumes zurückgeführt werden, da gerade die Proben P3 und P4 fast identische Verläufe der Saugspannungskurve zeigen. Die mobilisierte mittlere Feinstpartikelgröße ist daher eher als Funktion der mobilisierbaren im Porenraum vorhandenen Feinstpartikelgröße zu sehen, da bei Proben einer Lokalität und gleichem Versuchsablauf unterschiedliche Feinstpartikelgrößenspektren mobilisiert wurden.

Die beobachtete Abflachung der Feinstpartikelsummenkurve mit kumulativem Porenvolumen im Probenkern P3 bedeutet eine Erhöhung des Ungleichförmigkeitsgrades bei steigender Transportkraft im Porenraum. Die Erhöhung des Großkornanteils ist dabei mit

dem vermuteten Zusammenhang zwischen Feinstpartikelgröße und steigender Transportkraft zu erklären. Die Erhöhung des Kleinstpartikelanteils (<1 µ) ist vermutlich auf die Mobilisierung von kleineren Feinstpartikeln während der mechanischen Mobilisation von größeren Partikeln zurückzuführen.

Die Ellipsität der Feinstpartikel konnte in keinen Zusammenhang mit der Transportkraft oder der mittleren Partikelgröße gestellt werden.

Durch die morphologische Erhöhung der einzelnen aufsedimentierten Partikel auf dem Glasträger ist die Auswertung der markierten Farb-Intervalle immer etwas kleiner als die wahre Gestalt des Partikels, so daß die Werte der digitalen Bildanalyse als Minimalwerte der Korngröße angesehen werden müssen.

Die mineralogische Zusammensetzung der Poreneluate zeigt eine eindeutige Affinität zu den bei BAUER (1994) detailliert untersuchten authigenen Mineralneubildungen in den Porenräumen der Sandsteine.

Der Vergleich der semiquantitativen mineralogischen Auswertung der Poreneluate mit der mineralogischen Zusammensetzung der authigenen Minerale im Porenraum zeigt eindeutig eine hydraulische Selektivität, die mit den von NEASHAM (1977) dargestellten Morphotypen zu erklären ist und in ähnlicher Weise in der Arbeit von NEASHAM (1977) an Berea-Sandsteinen beobachtet wurde. Kaolinit ist aufgrund seines Vorkommens in diskreten Partikeln im Porenraum am leichtesten im Fluidstrom zu bewegen und bildet daher das Hauptmineral der Poreneluate. Radialstrahlige oder porenüberbrückende Mineralaggregate benötigen dagegen eine sehr viel höhere mechanische Beanspruchung, um im Porenraum mobilisiert zu werden, wobei sowohl Chlorit als auch Illit in diesen Morphotypen vorkommen kann. Eine Tendenz in der Abfolge der Mobilisation einzelner Minerale konnte bis auf die Dominanz von Kaolinit nicht aufgezeigt werden. Die Auswertung der authigenen Minerale im Gesamtporenraum an Hand von Dünnschliffen ist allerdings aufgrund der aufgezeigten Unterschiede zwischen Gesamtporenraum und hydraulisch genutztem Porenraum nicht direkt übertragbar, denn es ist davon auszugehen, daß Porenräume mit porenüberbrückenden authigenen Mineralaggregaten auf Grund des hohen schwer beweglichen Wasseranteils hydraulisch nicht mehr verfügbar sind (siehe Abb. 18).

Die geringen Anteile von Quarz in den Poreneluaten können als Beweis für den negierbaren Eintrag von Gesteinsmehl aus Bohr- und Sägevorgang dienen und lassen den Schluß eines geringen Fehlers durch die Methodik der Kerngewinnung und Aufbereitung zu.

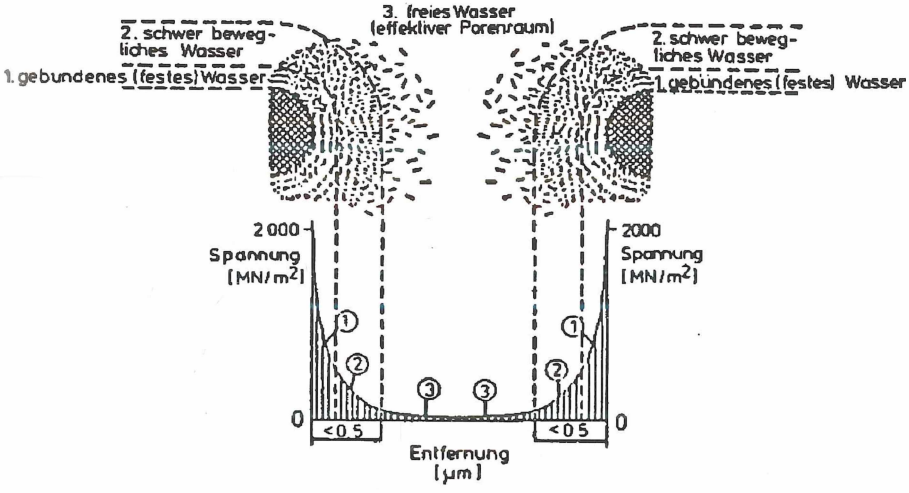


Abb. 18: Schematische Darstellung der Bindungskräfte zwischen Wasser und Mineralkorn und Typisierung unterschiedlicher Wasserarten im Kornverbund (aus WALZENBACH, 1991)

Aus dem fehlenden Anteil einer smectitischen Tonmineralphase im Porenraum und der Untersättigung dieser Phase bei der Modellierung der Fluid-Festgesteins-Interaktion kann geschlossen werden, daß die in den Durchströmungsversuchen beobachtete Permeabilitätsreduktion einzig auf die Mobilisation von Feinstpartikeln zurückgeführt werden kann. Eine Permeabilitätsschädigung durch Quellung tonmineralischer Komponenten ist somit ausgeschlossen.

5.4 Modellberechnungen

Das in Kapitel 2 beschriebene Kräftemodell der im Abstand h von der Porenwand an ein sphärisches Partikel angreifenden Auftriebskraft (F_L), Scherkraft (F_D), London-van der Waalssche Anziehungskraft (F_A) und Doppelschicht-Rückstoßkraft (F_R) ist mit den Daten der Laborversuche berechnet worden. Das Ziel dieser Berechnung war die Bestimmung der dominanten Art der Mobilisation (hydrochemisch oder hydrodynamisch). Aus den Gleichungen (1) und (2) läßt sich unter Kenntnis der Ionenstärke der Lösung die wirkende hydrochemische Kraft abschätzen. In Abb. 19 ist die Summe aus der London-van der Waalsschen Anziehungskraft und der Doppelschicht-Rückstoß-Kraft in ein Diagramm gegen den Abstand zwischen Korn und Partikel h aufgetragen. Es zeigt sich deutlich in Abb. 19 durch Komprimierung der elektrischen Doppelschicht bei höherer Ionenstärke der Lösung eine stärkere resultierende Anziehung und ein Einsetzen dieser anziehenden Kraft bei geringeren Abständen von ca. 0,1 µm zwischen Korn und Partikel. Bei Berechnung mit den Analysen des Krumbachtals, die als rezente Porenwässer bezeichnet werden können, wirkt eine anziehende hydrochemische Kraft erst im Abstand von ca. 0,25 µm und ist vom Betrag um rund $^1/_4$ kleiner als die für das Laborfluid berechnete. Beide berechnete Kurven der resultierenden hydrochemischen Kraft nähern sich bei wachsendem Abstand zwischen Korn und Partikel asymptotisch als anziehende Kraft dem Wert Null.

Aus dieser Betrachtung der hydrochemischen Kräfte geht eindeutig hervor, daß durch die Verwendung des Laborfluids eine hydrochemische Stabilisierung des Korn-Partikel-Gefüges erzielt wurde und von einer hydrochemisch induzierten Feinstpartikelmobilisierung nicht ausgegangen werden kann. Eindeutig höher ist die Gefahr der Partikelmobilisation im rezenten Aquifer, da die resultierende Partikel-Korn-Anziehung relativ gering

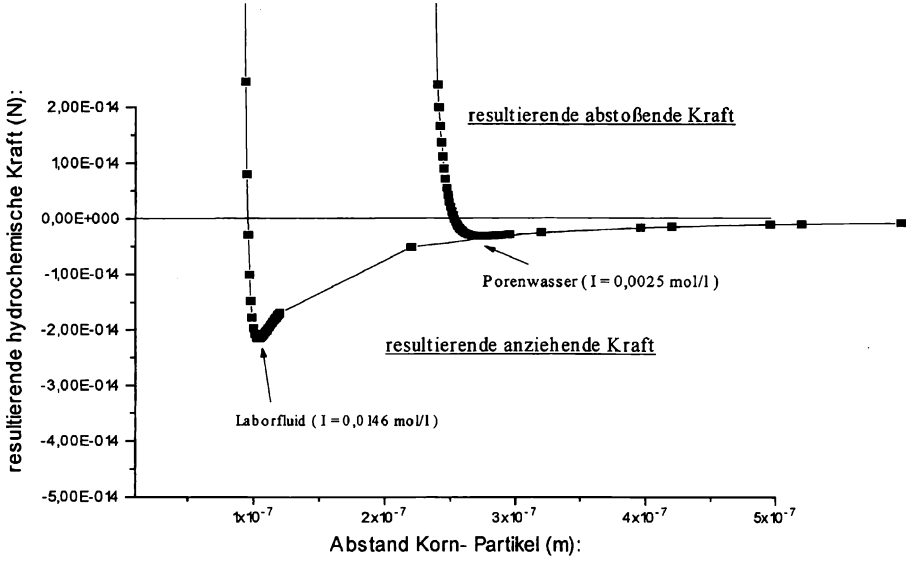


Abb. 19: Diagramm der resultierenden hydrochemischen Kraft gegen den Korn-Partikel-Abstand h

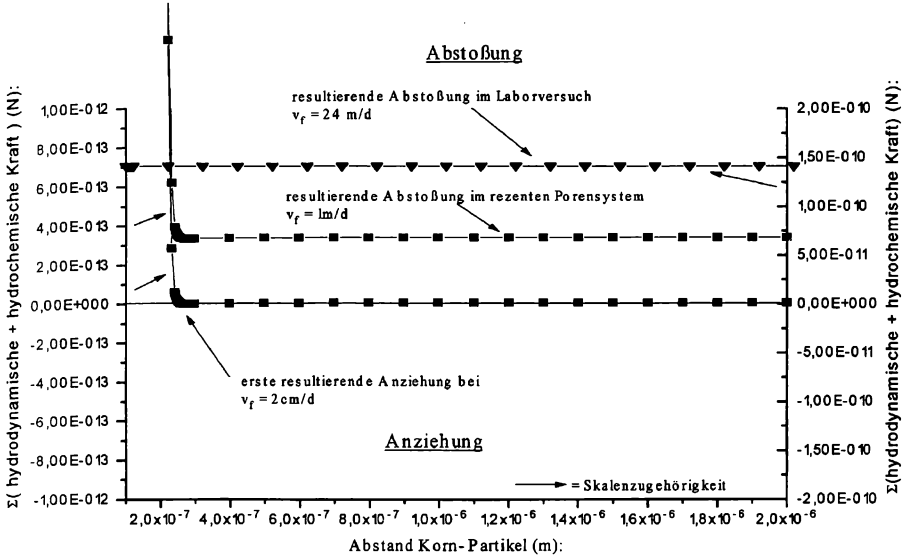


Abb. 20: Summe der hydrochemischen und hydrodynamischen Kräfte im Abstand h zwischen Korn und Partikel

ist und je nach vorherrschender Fließgeschwindigkeit eine Mobilisation angenommen werden kann. Deutlich resultiert jedoch in beiden berechneten Fällen mit von bivalenten Kationen dominierten Lösungen eine der Mobilisation entgegenwirkende anziehende Kraft, obwohl die kritische Salzkonzentration CSC für monovalente Lösungen (0,07 mol/l für Na^+ und 0,006 mol/l für Cs^+ nach KHILAR & FOGLER, 1984) bei den rezenten Porenwässern schon weit unterschritten ist. Dieses rechnerische Ergebnis bestätigt Untersuchungen von KHILAR & FOGLER (1984), die bei Lösungen mit einer Dominanz bivalenter Kationen keine kritische Salzkonzentration (CSC) feststellen konnten. Zur Gesamteinschätzung der resultierenden Kraft ist die Summe aller auf ein Partikel nach dem vorgestellten Modell wirkenden Kräfte gegen den Abstand Korn-Partikel in Abb. 20 eingetragen. In Abb. 20 sind die resultierenden Kräfte sowohl bei den Bedingungen im Labor als auch im rezenten Aquifer mit der Annahme einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/d, wie sie von MATTHES & UBELL (1983) als Richtgröße für Fluidgeschwindigkeiten in sedimentären Aquiferen angegeben wird, dargestellt. Es ist eine Dominanz der hydrodynamischen Kräfte und eine resultierende abstoßende Kraft in beiden berechneten Fällen zu beobachten. Unter hydrodynamischen Kräften werden die nach Gleichung (3) berechnete Auftriebskraft und die nach Gleichung (4) berechnete Scherkraft verstanden.

Für die im Labor angelegten Fließgeschwindigkeiten gilt in Abb. 20 die rechte Skalierung, während die linke Skalierung für die resultierenden Kräfte im Aquifer und für die Berechnung der maximalen Fließgeschwindigkeit mit anziehender Kraftwirkung in Teilbereichen des Abstandes Korn-Partikel Gültigkeit besitzt. Das Verhältnis zwischen mobilisierender Kraft im Labor und im Aquifer beträgt nach Abb. 20 etwa drei Größenordnungen und zeigt gleichzeitig, daß in den rezenten Porensystemen eine Mobilisation von Feinstpartikeln in gleichen Maße stattfinden kann. Die dritte in Abb. 20 angeführte Kurve gibt die maximale Fließgeschwindigkeit von 2 cm/d an, bei der erstmalig nach dem vorgestellten Kräftemodell eine resultierende anziehende Kraft in bestimmten Abstandsbereichen h zwischen Korn und Partikel wirkt. Da diese Fluidgeschwindigkeiten in Aquiferen selten realisiert sind, muß davon ausgegangen werden, daß in sandigen, siliziklastischen Aquiferen mit einer geringen Ionenstärke zur Grundwassergewinnung nach diesem vorgestellten Modell immer eine resultierende abstoßende bzw. mobilisierende Kraft vorliegt.

Dieses Ergebnis der Interpretation wird durch Beobachtungen von GRUESBECK & COLLINS (1982) bestätigt, die auch unterhalb der kritischen Fließgeschwindigkeit v_C einen Feinstpartikelaustrag in Laborversuchen feststellten, wobei aber die Konzentration der Feinstpartikel bei diesen Filtergeschwindigkeiten nicht ausreichte, um eine Permeabilitätsschädigung im porösen Medium zu bewirken.

Aus diesem Zusammenhang wird ersichtlich, daß das Kräftemodell ein guter Ansatz zur Differenzierung zwischen hydrodynamischen und hydrochemischen Kräften darstellt, nicht jedoch direkt von einer resultierenden mobilisierenden Kraft auf eine Permeabilitätsschädigung des Aquifers geschlossen werden kann.

Ein weiteres Modell zur Beschreibung der Mobilisation von Feinstpartikeln bietet der Ansatz der Suffosion und Kolmation nach BUSCH & LUCKNER (1974), der nur auf geometrische und hydraulische Parameter zurückgreift und hydrochemische Kräfte vollkommen vernachlässigt. Da bei der Gesamtkräftemodellrechnung gezeigt wurde, daß die chemischen Kräfte um Größenordnungen geringer als die hydrodynamischen Kräfte sind, kann der von BUSCH & LUCKNER (1974) gewählte Ansatz im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden. Es empfiehlt sich aber in diesem Zusammenhang, vor jeder Anwendung dieses Ansatzes die Gewichtung der hydrochemischen und hydrodynamischen Kräfte zu überprüfen, um den Fehler der Berechnung abschätzen zu können. Für die in dieser Arbeit verwendeten Fluide und den hydraulischen Gradient liegt der auf Basis der Kraftbeträge berechnete Fehler durch Vernachlässigung der hydrochemischen Kräfte bei ca. 0,05%.

Aus der Zusammenstellung der Tab. 5 geht hervor, daß für alle gewählten Proben die geometrische Suffosionsicherheit $\eta_{S,G}$ bei keiner Probe gegeben ist.

Tab. 5: Zusammenfassung der Suffosionsberechnung nach BUSCH & LUCKNER (1974)

Probe:	$d_{k,min}$ (mm)	d_k (mm)	$\eta_{S,G}$	$\eta_{S,H}$	φ_o
P1	0,03	0,67	0,07	immer > 2	0,39
P3	0,02	0,11	0,34	immer < 2	0,36
P4	0,03	0,21	0,23	immer < 2	0,36
Z5	0,02	0,45	0,09	> 2 und < 2	0,41
Z7	0,03	0,21	0,21	immer < 2	0,28
Z13	0,01	0,11	0,22	> 2 und <2	0,41
Z14	0,02	0,11	0,24	immer > 2	0,42
M1	0,03	0,44	0,12	immer < 2	0,37
M2	0,03	0,72	0,08	> 2 und < 2	0,25

Die Überprüfung des hydraulischen Suffosionskriteriums $\eta_{S,H}$ zeigt kein einheitliches Bild der Ergebnisse. In den senkrecht erbohrten Proben ist das hydraulische Suffosionskriterium aufgrund der geringen Permeabilitäten und dem daraus folgenden hohen kritischen Suffosionsgefälle $i_{S,krit}$ meist erfüllt. Die relativ hohe Durchlässigkeit in den waagerechten Bohrkernen führt zur Suffosion in diesen Proben, da das hydraulische Suffosionskriterium nicht mehr erfüllt ist. Einzige Ausnahme in diesem Zusammenhang bildet die Probe Z5 aus dem Steinbruch Zeidler & Wimmel, die aber im Schnitt um eine Größenordnung niedrigere Durchlässigkeitsbeiwerte als andere waagerechte Proben in den Permeameter-Versuchen zeigt. Im Zuge der Laborversuche konnte an einigen Proben eine

Permeabilitätsschädigung festgestellt werden, die z. T. dazu führt, daß der Wert des hydraulischen Suffosionskriteriums nach und nach wieder über den Grenzwert von 2 steigt und eine hydraulische Suffosionssicherheit gegeben ist. Die nicht beobachtete Permeabilitätsreduktion in den Proben des Steinbruchs Zeidler & Wimmel können nur zum Teil mit den berechneten Suffosionskriterien geklärt werden. Nach der Theorie der Suffosion und Kolmation liegt über weite Bereiche in der Probe Z5 eine hydraulische Suffosionssicherheit vor. Aus den Analysen der Poreneluate zeigt sich jedoch auch in der Probe Z5 eine Feinstpartikelmobilisation, die jedoch von ihrer Konzentration nicht ausreicht, um eine Permeabilitätsschädigung zu verursachen. Auch die Probe Z7 fällt aus dem Rahmen der Berechnung, denn $\eta_{S,H}$ ist deutlich < 2 und die Feinstpartikelanalysen bestätigen die vorhandene Suffosion. Dennoch ist auch in dieser Probe keine deutliche Permeabilitätsschädigung zu beobachten.

Zusammenfassend kann also aus den berechneten Werten der Suffosion und den gemessenen Permeabilitäten im Labor geschlossen werden, daß eine vorhandene Suffosion für alle waagerechten Proben mit Permeabilitätsschädigung gegeben ist, aber auch eine Umlagerung von Feinstpartikeln in den Proben ohne Permeabilitätsschädigung stattfindet, die zum Teil das hydraulische Suffosionskriterium erfüllen. Ein Vergleich der beobachteten Permeabilitätsschädigungen mit dem Wert der hydraulischen Suffosion zeigt bei hohen Permeabilitätsschädigungen sehr kleine Werte des hydraulischen Suffosionkriteriums und damit verbundener hoher Partikelmobilisation.

Es kann also aufgrund der Berechnung der Suffosion abschließend festgestellt werden, daß eine hydraulische Mobilisation der Feinstpartikel in den Permeameter-Versuchen stattgefunden hat, aber auch hier wie im Kräfteansatz keine Quantifizierung des mobilisierten Feinstanteils und damit der Permeabilitätsschädigung i.w.S. möglich war. Durch die Berechnung der Suffosion und Kolmation konnten daher keine zusätzlichen Informationen gewonnen werden.

Nach Klärung der Mechanismen der Feinstpartikelmobilisation in den bearbeiteten Proben stellt sich die Frage nach den dominanten Ablagerungsmechanismen der suspendierten Feinstpartikel im Porenraum und die damit in Zusammenhang stehende Permeabilitätsreduktion. Im Zuge der Berechnung der Transportwirksamkeit wurden in dieser Arbeit die Transportmechanismen der Interception, Sedimentation, Diffusion und der Siebeffekt berücksichtigt. Um den dominanten Transportmechanismus in den einzelnen Probenkernen während der Versuchsphase zu charakterisieren, wurden zu jeder Probe die Werte der einzelnen Transportmechanismen und der daraus resultierende Filterfaktor λ unter Annahme einer Haftwahrscheinlichkeit γ_H von eins berechnet. Eine Übertragung der Laborergebnisse auf das rezente Aquifersystem mit der geringen Ionenstärke von 0,0025 mol/l ist nicht ohne weiteres möglich. Mit der von BEDBUR (1989) empirisch gefundenen Beziehung zwischen Haftwahrscheinlichkeit und Debye-Hückel-Parameter kann allerdings diese Haftwahrscheinlichkeit γ_H für das reale System nach Gleichung (9) abgeschätzt und die im Labor ermittelten Filterfaktoren korrigiert werden.

Aus Gleichung (9) ergibt sich mit den nach Gl. (5) ermittelten Debye-Hückel-Längen eine Haftwahrscheinlichkeit γ_H von 1,25 für das Laborsystem und 0,93 für das rezente Aquifersystem. Die empirisch gefundene Gleichung (9) von BEDBUR (1989) für gleichförmige Lockersande ergibt für die Laborversuche an Festgesteinen eine Haftwahrscheinlichkeit von über einhundert Prozent und ist daher nicht direkt auf die in dieser Arbeit verwendeten Festgesteinsproben übertragbar.

Es ist jedoch aufgrund dieser Beziehung möglich einen Hinweis über das Verhältnis der Haftwahrscheinlichkeiten zu erlangen. Die Abschätzung ergibt eine um ca. 25% geringere Haftwahrscheinlichkeit im Bereich des Aquifers im Vergleich zum Laborsystem. Diese Feststellung ist vor allem bei Aussagen der möglichen Permeabilitätsschädigung und Abschätzung der kritischen Filtergeschwindigkeit aus Labordaten für das Aquifersystem von Bedeutung.

Einen Überblick über die Änderung des Filterfaktors mit der Filtergeschwindigkeit in den einzelnen bearbeiteten Proben gibt die Abb. 21. Bei dieser Betrachtung wird der Feinst-

partikeldurchmesser als konstant angenommen und nimmt den Mittelwert aus allen Proben der Poreneluate an. Diese Annahme wurde zur Vereinfachung der Modellrechnung gewählt. Jedoch zeigt sich in den Versuchen die in Abb. 17 dargestellte teilweise Abhängigkeit des Partikeldurchmessers von der Filtergeschwindigkeit. Da aber durch den Versuchsaufbau bedingte „in situ"-Mobilisation von Feinstpartikeln nur die Feinstpartikelgröße des ausgeströmten Fluids gemessen wurde, ist dies die einzige Information über die mobilisierte und transportierte Partikelgröße und wurde daher für die Berechnung verwendet. Für die Korngröße des porösen Mediums ist die wirksame Korngröße d_w bei der Berechnung eingesetzt worden, die deutlich unter den d_{50}-Werten der jeweiligen Probe liegt und daher hohe Filterfaktoren ergibt. Dieser Schritt ist mit den signifikanten Unterschieden zwischen senkrechten und waagerechten Proben bei dem Parameter der wirksamen Korngröße zu erklären.

Aus der Auftragung der Filtergeschwindigkeit gegen den Filterfaktor geht hervor, daß der Filterfaktor λ mit zunehmender Filtergeschwindigkeit sich asymptotisch einem Endwert annähert. Dieser Zusammenhang ist auch aus den Gl. (11) bis (14) ersichtlich, denn bei zunehmender Filtergeschwindigkeit werden die Transportmechanismen der Sedimentation und Diffusion unendlich klein und der Filterfaktor λ ist nur noch von den für eine Probe konstanten Größe der Interception und des Siebeffektes abhängig. Bei niedrigen Filtergeschwindigkeiten ist der Filterfaktor dagegen primär von den Größen der Sedimentation und Diffusion und damit von der Filtergeschwindigkeit v_f abhängig, während die Interception und der Siebeffekt in den Hintergrund treten.

Es zeigt sich damit eine starke Abhängigkeit des Filterfaktors von der Größe der Filtergeschwindigkeit. In der Arbeit von BEDBUR (1989) konnte der in Abb. 22 dargestellte Verlauf des Filterfaktors als Funktion der Varianz der Feinstpartikelgröße bei konstanter Filtergeschwindigkeit aufgezeigt werden. Dieser aufgezeigte Verlauf ist in ähnlicher Form an Hand der beobachteten Partikelgrößenzunahme mit der Filtergeschwindigkeit auch für diese Arbeit feststellbar (Abb. 23). Aufgrund der gleichzeitigen Abnahme der Filtergeschwindigkeit und des Feinstpartikeldurchmessers steigt der Filterfaktor zu geringen Partikeldurchmessern exponentiell stark an. Ein Transport gröberer Feinstpartikel mit steigender Filtergeschwindigkeit bewirkt aber eine stärkere Erhöhung der Transport-

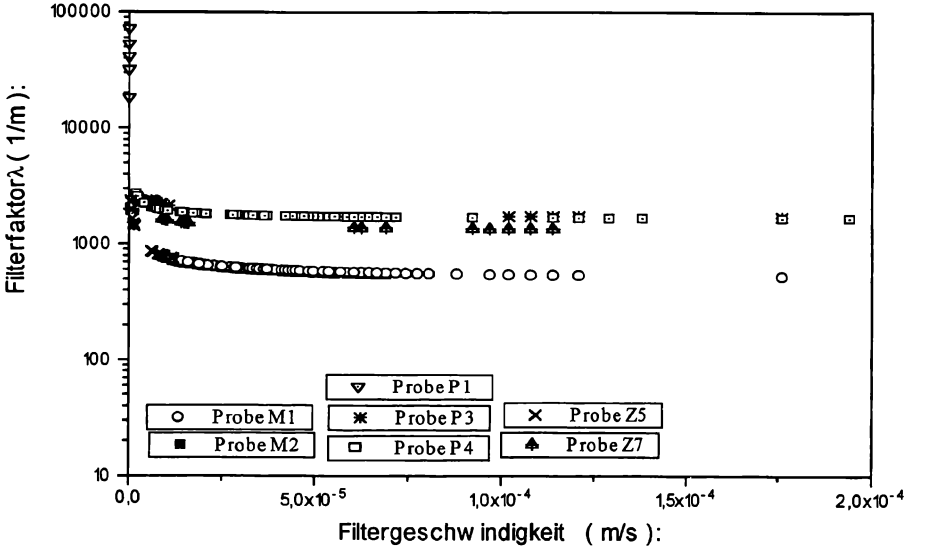


Abb. 21: Abhängigkeit des Filterfaktors λ von der Filtergeschwindigkeit in den einzelnen bearbeiteten Proben

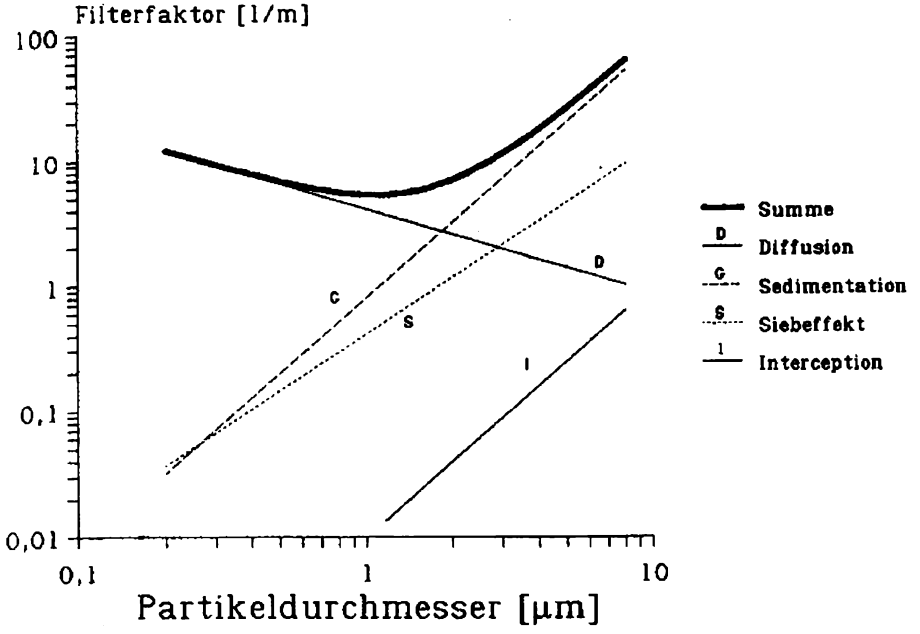


Abb. 22: Darstellung der Einzelbeträge der Transportmechanismen zum Filterfaktor in Abhängigkeit des Feinstpartikeldurchmessers (aus BEDBUR, 1989)

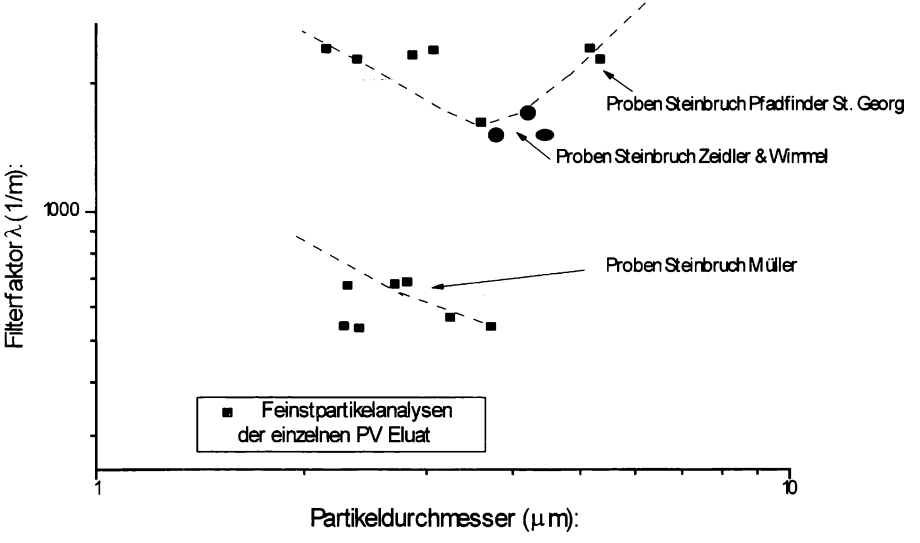


Abb. 23: Abhängigkeit des Filterfaktors von den Feinstpartikeln der einzelnen PV Eluat

mechanismen Interception, Sedimentation und Siebeffekt, so daß der Wechsel der dominanten Mechanismen verstärkt wird (Abb. 22 und Abb. 23).

Aus dem Zusammenhang des Verlaufs des Filterfaktors wird deutlich, daß eine bestimmte Partikelgröße für eine definierte Filtergeschwindigkeit eine minimale Permeabilitätsschädigung aufweisen muß, wie in der Arbeit von O`MELIA & ALI (1978) experimentell bestätigt wurde. Für die Probenkerne aus dem Steinbruch „Pfadfinder St. Georg" kann aus Abb. 23 eine Partikelgröße von 3-4 µm für minimale Permeabilitätsschäden abgeschätzt werden.

Die Werte der Filterfaktoren bzw. der einzelnen Transportmechanismen sind mit dem Feinstpartikeldurchmessers des Poreneluats zu begründen. Geringe Korngrößen im Poreneluat bedeuten einen hohen Grad der Abscheidung des mobilisierten Korngrößenspektrums im Probenkern und Proben mit hohen Partikelabscheidegraden zeigen daher eine geringe Feinstpartikelgröße im Eluat.

Eine Abhängigkeit des Filterfaktors von der Größe der Unförmigkeit U konnte nicht nachgewiesen werden.

Der aus den Gl. (11) bis (14) abgeleitete Zusammenhang ergibt für die senkrechten Proben mit einem sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwert als dominante Transportmechanismen die Größen der Sedimentation und Diffusion, während der Siebeffekt und die Interception eine untergeordnete Rolle spielen. Für die senkrechten Bohrkerne ist daher aufgrund dieser dominanten Transportmechanismen eine Abhängigkeit des Filterfaktors von der Filtergeschwindigkeit des durchströmenden Fluids gegeben.

Im Gegensatz dazu zeigen die waagerechten Proben bei fast allen Bohrkernen den Siebeffekt als dominanten Transportmechanismus. Die Diffusion ist bei niedrigen Filtergeschwindigkeiten der zweitgrößte Transportmechanismus und wird erst bei hohen Filtergeschwindigkeiten kleiner als die Interception. Aus dieser Beobachtungen kann gefolgert werden, daß im Bereich niedriger Filtergeschwindigkeiten v_f der Filterfaktor in den waage-

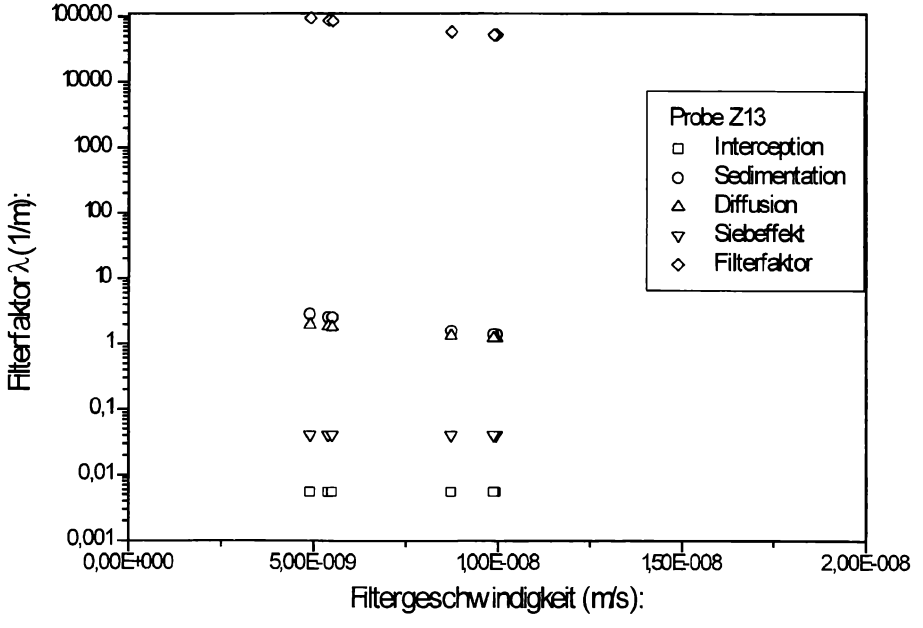


Abb. 24: Varianz des Filterfaktors und der Transportmechanismen mit v_f in der senkrechten Probe Z13

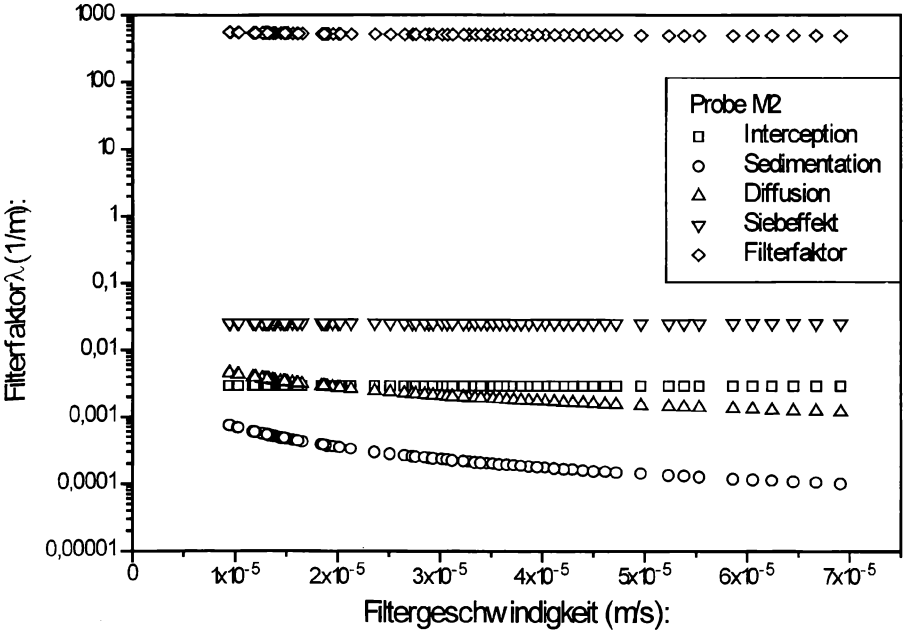


Abb. 25: Varianz des Filterfaktors und der Transportmechanismen mit v_f in der waagerechten Probe M2

rechten Proben noch bedingt von der Filtergeschwindigkeit abhängig ist, während bei hohen Filtergeschwindigkeit der Filterfaktor λ eine Funktion der sedimentologischen Rahmenparameter des Korn- und Partikeldurchmessers ist, wobei der Feinstpartikeldurchmesser wiederum in Abhängigkeit zur Filtergeschwindigkeit steht.

An der senkrechten Probe Z13 und der waagerechten Probe M2 ist dieser Zusammenhang nochmals exemplarisch dargestellt (Abb. 24 und 25).

Aus diesen Berechnungen kann geschlossen werden, daß der Siebeffekt der dominante Transportmechanismus bei den durchgeführten Versuchen mit Permeabilitätsschädigung ist, während bei senkrechten und waagerechten Probenkernen mit der Diffusion bzw. Sedimentation als dominantem Transportmechanismus keine Permeabilitätsschädigung beobachtet werden konnte.

Das im Zuge der Charakterisierung der Transportmechanismen nicht zu klärende Verhalten der Probe Z7 des Steinbruchs Zeidler & Wimmel ist möglicherweise auf eine zu geringe Konzentration bzw. zu geringe Größe der mobilisierten Feinstpartikel zurückzuführen, so daß ein hydraulisches Regime für eine Permeabilitätsreduktion vorhanden war, aber aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit einer ausreichenden Menge an Feinstpartikeln mit einer für den Siebeffekt wichtigen Partikelgröße diese nicht stattfand. Der Einfluß der Feinstpartikelkonzentration wird um so bedeutender, je höher der vernetzte Grobporenanteil bzw. indirekt die Porosität n ist.

Im Fall der Probe Z7 zeigt sich eine hohe Porosität von ca. 25% und ein hoher schnell dränender Grobporenanteil von ca. 25 Gew. –% Restwasser (Abb. 16). Aus den gewonnenen Daten kann allein der hohe Anteil an hydraulisch wirksamen Grobporen für die fehlende Permeabilitätsreduktion verantwortlich gemacht werden.

Eine schlüssige Erklärung für die unterschiedliche Form der Permeabilitätsreduktion mit dem Ansatz der Transportmechanismen fällt schwer.

Im Bereich niedriger Filtergeschwindigkeiten zeigt sich eine Abfolge der dominanten Transportmechanismen von Diffusion, Siebeffekt, Interception und Sedimentation in den von Permeabilitätsreduktion betroffenen Proben und allgemein der höchste Wert des Filterfaktors λ. Liegt diese Abfolge der Transportmechanismen vor, so ist eine Permeabilitätsreduktion in Form einer steilen Exponentialkurve zu beobachten, die mit dem exponentiellen Verlauf des Filterfaktors λ konform geht. Bei diesem Vergleich des Filterfaktors mit der Permeabilitätsreduktion ist von einer konstanten Partikelkonzentration C_0 während der Versuchsdurchführung indirekt ausgegangen worden, die nicht haltbar ist (siehe Abb. 14). Es ist sehr wahrscheinlich, daß nach Flutung des porösen Mediums bei initialer Druckanlage eine große Menge an Feinstpartikeln (großes C_0) mobilisiert wird, und diese Konzentration der Feinstpartikel dann in Form einer Exponentialfunktion abflacht. Somit ist der hier beobachtete exponentielle Verlauf der Permeabilitätsschädigung ein Ergebnis der Varianz der Ausgangskonzentration an mobilisierten Feinstpartikeln C_0 und des Filterfaktors λ.

Bei der Betrachtung der Durchlässigkeitsbeiwert-Reduktionen mit flachem exponentiellem Verlauf muß immer beachtet werden, daß der Verlauf dieser Kurven aufgrund der gewählten Skalierung der Abszisse extrem flach ist. Die durchgeführte lineare Interpolation des Verlaufs der Permeabilitätsreduktion muß daher aufgrund der fehlenden Meßwerte über größere Meßbereiche kritisch betrachtet werden,und stellt möglicherweise eher das Ergebnis einzelner Feinstpartikelschübe dar. Die dominanten Transportmechanismen im Bereich hoher Filtergeschwindigkeiten sind der Siebeffekt und die Interception, während Diffusion und Sedimentation eine untergeordnete Rolle spielen.

Zusammenfassend kann mit der beschriebenen Varianz der Parameter der Ausgangskonzentration C_0 und dem Filterfaktor λ eine hohe Wahrscheinlichkeit der Permeabilitätsreduktion im Anfangsstadium der Durchströmung mit dem für diese Arbeit gewählten Versuchaufbau und im Bereich relativ hoher Filtergeschwindigkeiten geschlossen werden, während im Bereich mittlerer Filtergeschwindigkeiten diese Reduktion nicht zu erwarten ist.

5.5 Abschätzung der kritischen Filtergeschwindigkeit

Aus den Permeameterversuchen mit Permeabilitätsschädigung kann eine Definition der kritischen Filtergeschwindigkeit erfolgen, bei deren Überschreitung mit Permeabilitätsschädigungen in den Sandsteinproben zu rechnen ist. Dieser gefundene Wert der Permeabilitätsreduktion kann unter Berücksichtigung der Haftwahrscheinlichkeit γ_H für die Analyse der Porenwässer auf das reale Aquifersystem übertragen werden. In den Abbildungen 26 und 27 ist für die Gesteine des Steinbruchs Müller und Pfadfinder St. Georg die Filtergeschwindigkeit gegen die gefundenen Permeabilitätsschädigungen aufgetragen.

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_{f0} ist dabei als maximaler Anfangswert definiert, während k_{fend} den asymptotischen Endwert des Durchlässigkeitsbeiwertes darstellt. Durch lineare Interpolation auf die Abszisse ist es möglich, aus dem Diagramm der Abb. 26 die kritische Filtergeschwindigkeit abzulesen.

Für eine Fehlerabschätzung der kritischen Fließgeschwindigkeit ist die obere und untere einhüllende Gerade der Meßpunkte verwendet worden.

Die kritische Geschwindigkeit v_c für die Gesteine des Steinbruchs Müller liegt damit für das Laborwasser als durchströmendes Fluid unter Berücksichtigung des Fehlers bei $1{,}7 \pm 0{,}8$ m/d.

Die Übertragung dieser gewonnen kritischen Filtergeschwindigkeit auf das reale Aquifersystem gestaltet sich für die hohen Filterfaktoren aller Proben einfach, da eine Abweichung der Haftwahrscheinlichkeit von 30% bei der Größe der Filterfaktoren von ca. 500 im Steinbruch Müller im Grunde keine Veränderung der Konzentration der eingefangenen Feinstpartikel C_c hervorruft und somit die Permeabilitätsschädigung unab-

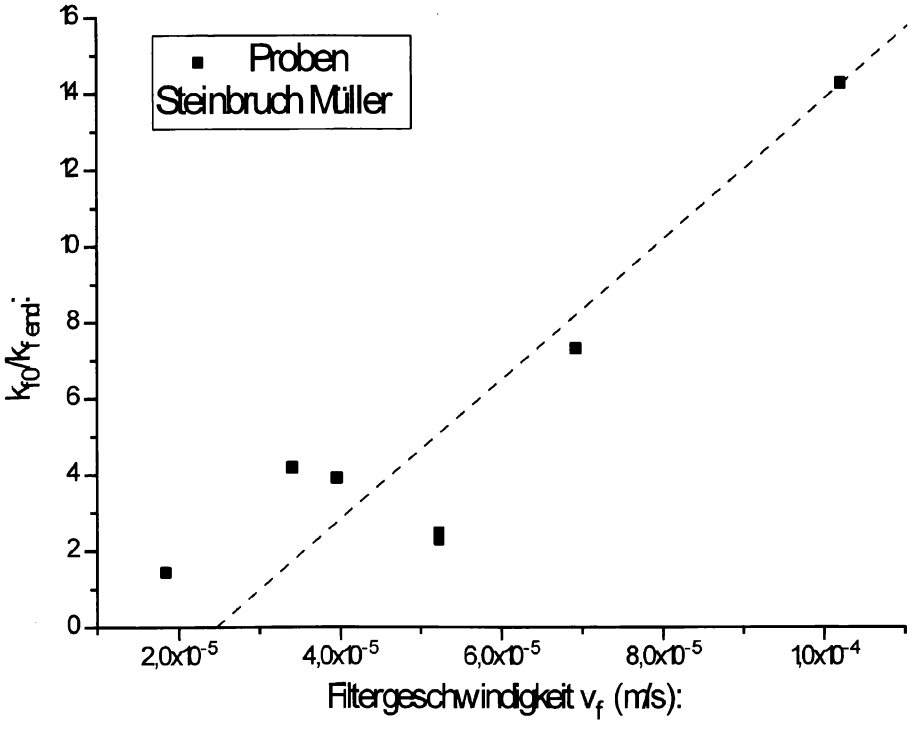


Abb. 26: Durchlässigkeitsbeiwert-Reduktion in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit

hängig von der Haftwahrscheinlichkeit γ_H ist. Wird für die Berechnung des Filterfaktors bzw. Einzelkollektorabscheidegrads γ^* nicht die wirksame Korngröße, sondern der d_{50}-Wert benutzt, so ergibt sich ein minimaler Filterfaktor von ca. 30 und eine Abweichung in der Konzentration der eingefangenen Partikel von ca. 20%. Die Berechnung der Abweichung in der Permeabilitätsschädigung kann für diesen Filterfaktor in dieser Arbeit nicht erfolgen, da keine Information über die Konzentration oder die Menge an „in situ" mobilisierten und wieder eingefangenen Feinstpartikeln vorliegt.

Aus den Permeabilitätsschädigungen der Proben des Steinbruchs Pfadfinder St. Georg läßt sich keine lineare Beziehung in Form der Abb. 26 erkennen (Abb. 27). Die Abweichung besteht vor allem in den hohen Permeabilitätsschädigungen im Bereich niedriger Filtergeschwindigkeiten und zeigt einen Verlauf der Durchlässigkeitsbeiwert-Reduktion in Kongruenz zum Verlauf des Filterfaktors der Abb. 24 und 25.

6 Ausblick

Viele im Zuge dieser Arbeit erörterte Fragen konnten nicht hinreichend beantwortet werden. So läßt der in dieser Arbeit gewählte Versuchsaufbau mit einer „in situ"-Mobilisation von authigenen und detritischen Feinstpartikeln zu und die Messung dieser Feinstpartikel im Poreneluat gibt keine Aufschlüsse über die Korngröße und Kornform der im porösen Medium für die Permeabilitätsreduktion verantwortlichen abgelagerten Feinstpartikel. Eine Versuchsdurchführung in Form einer Durchströmung des porösen

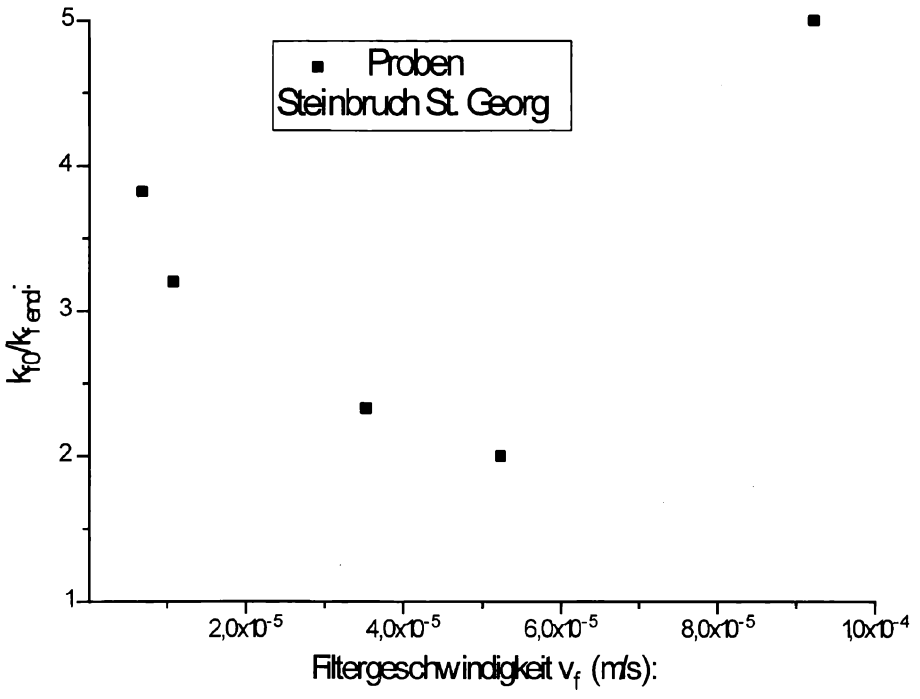


Abb. 27: Durchlässigkeitsbeiwert-Reduktion in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit

Mediums mit Feinstpartikelsuspensionen unterschiedlicher Fraktionen und Konzentrationen würde sowohl den Parameter der Konzentration der Feinstpartikel als auch die Korngröße der abgelagerten Feinstpartikel genau definieren.

Die vereinfacht gewählte Form der Permeameter-Versuche mit Leitungswasser als Durchströmungsfluid läßt eine Berechnung des Abscheidegrades für das reale System nur nach der von BEDBUR (1989) empirisch gefundenen Formel (9) zu. Die für das Laborfluid postulierte und mit der berechneten Haftwahrscheinlichkeit γ_H auf das reale System übertragene kritische Geschwindigkeit v_c bedarf einer Überprüfung durch Laborversuche.

Weiterführende Laborversuche mit einem Laborfluid ähnlich der Analyse des rezenten Porenwassers und einer Geschwindigkeit unterhalb und oberhalb der postulierten kritischen Fließgeschwindigkeit v_c sind geplant.

Zur Beschreibung der Morphotypen der authigenen Tonminerale und ihrer Verfügbarkeit im Porenraum wird als sinnvolle Ergänzung der Dünnschliffe eine Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt werden.

Die aus der Berechnung des Kräftemodells der auf ein Feinstpartikel wirkenden Kräfte gemachten Aussagen zur Partikelmobilisation konnten nicht direkt auf eine Permeabilitätsschädigung übertragen werden. Eine vorstellbare Möglichkeit der Anwendung kann in Zukunft die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen Betrag der mobilisierenden Kraft bzw. Filtergeschwindigkeit i.w.S. und mobilisierter Konzentration an Feinstpartikeln bestehen, so daß aus den berechneten Kraftbeträgen direkt eine mögliche Permeabilitätsschädigung abgeschätzt werden kann.

Das digitale Bildanalysesystem des Programms DIAna ergab im Bereich der Porengrößenauswertung durch die Präparation der Dünnschliffe (Anfärbung aller Porenräume)

wenig aussagekräftige Informationen zur Hydraulik. Eine Optimierung der Methode durch eine Durchströmung des Probenmaterials mit dem Färbungsmittel vor der Präparation zur Färbung des hydraulisch vernetzten Porenraums ist geplant. Zusätzlich hätte dieses Präparationsverfahren den Vorteil der Analyse der authigenen Minerale im hydraulisch wirksamen Porenraum.

7. Danksagung

Für das stetige Interesse an dem Fortgang dieser Arbeit und den anregenden Diskussionen mit weiterführenden Ideen danke ich Prof. Dr. D. Schenk (Universität Mainz).

Herrn Dr. H. Knoke und Herrn Dipl. Geol. B. Horstmann danke ich für die Einführung und Hilfe bei Problemen mit dem Labor-Permeameter, sowie zahlreichen konstruktiven Diskussionen.

Ich möchte Prof. Dr. Oberhänsli, Dr. B. Schulz-Dobrick, Dr. H. D. Werner, Dr. T. Brachert, Dr. U. Altenberger, Dipl. Min. Andreas Kronz und Dipl. Geol. Diana Holzwarth für ihre Ratschläge und die zur Verfügung gestellten alternativen Meßmethoden danken, auch wenn die analytischen Ergebnisse nur zum Teil Verwendung in dieser Arbeit fanden.

Bei CTA Caroline Brückner und Dipl. Geol. S. Broschinski möchte ich mich für die Analyse des Laborwassers bedanken.

Für die gute Zusammenarbeit und den regen Informationsaustausch mit meinen Studienkollegen und Freunden Andreas Bauer und Udo Peth sei an dieser Stelle ein „Dankeschön" ausgesprochen. Ich möchte mich für die schöne gemeinsam verbrachte Zeit während des Studiums bedanken und hoffe, daß auch nach Abschluß des Studiums dieser freundschaftliche Kontakt erhalten bleibt.

Meiner Freundin Nicole Ickstadt und meinen Eltern sei ein besonderer Dank für die moralische Unterstützung, vor allem während der Versuchsphase ausgesprochen.

8 Literaturverzeichnis

ATTERBERG, A. (1911): Über die physikalische Bodenuntersuchung und über die Plastizität der Tone. – Intern. Mitt. Bodenkunde, **1:** 10-43, Berlin.

BAUER, A. (1994): Diagenese des Buntsandsteins im Bereich der Rheingraben-Westrandstörung bei Bad Dürkheim . – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Mainz.

BAUER; A. (1994): Diagenese des Buntsandsteins im Bereich der Rheingraben-Westrandstörung bei Bad Dürkheim. – Mitt. POLLICHIA, **81:** 215-289, Bad Dürkheim.

BEDBUR, E. (1989): Laboruntersuchungen zum Einfluß sedimentologischer und hydraulischer Parameter auf die Filterwirkung gleichförmiger Sande. – Ber. Geol. Paläont. Inst. Univ. Kiel, Nr. 31, 77 S., 35 Abb., 23 Tab., Kiel.

BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. – WWT, **14:** 165-168, 7 Abb., 3 Tab., Berlin.

BEYER, W. & SCHWEIGER, K. H. (1969): Zur Bestimmung des entwässerbaren Porenanteils der Grundwasserleiter. – WWT, **19:** 57-60, 9 Abb., Berlin.

BICAYE, P. E. (1965): Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the atlantic ocean and adjacent seas and oceans. – Geol. Soc. Amer. Bull., **76:** 803-832, Boulder/Colo.

BROWN, R. H., KONOPLYANTSEV, A. A., INESON, J. & KOVALEWSKI, V. S. (1975): Ground-water studies. – Studies and reports in hydrology, **7,** Paris (UNESCO).

BUSCH & LUCKNER (1974): Geohydraulik für Studium und Praxis. – 442 S., 277 Bilder, 58 Tab., Stuttgart: Enke.

CARMAN, P. C. (1937): Fluid flow through granular beds. – Trans. Inst. Chem. Eng., **15:** 150-166, London.

COSKUMER, G. & MAINI, B. (1989): Fines migration in heavy oil reservoirs. – Int. Conf. on Heavy Crude and Tar Sands, **4,** Vol. 3: 371-382.

DARCY, H. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon. – 674 S., Paris: Dalmont.

DIN 18123 (1971): Baugrund. – Untersuchungen von Bodenproben, Kornverteilung, 9 S., Berlin.

EINSELE, G. (1979): Tendenzen und Variationsbreite der Durchlässigkeit in einigen Locker- und Festgesteinsaquiferen Süddeutschlands. – Mitt. Ing. u. Hydrogeol., **9:** 283-312, Aachen.

GABRIEL, G. A. & INAMDAR, G. R. (1983): An experimental investigation of fines migration in porous media. – Soc. Petrol. Eng. J., SPE 12168: 1-12, Richardson, Tx..

GIMBEL, R. D. (1978): Untersuchungen zur Partikelabscheidung in Schnellfiltern. –Dissertation, 112 S., Karlsruhe.

GIMBEL, R. & SONTHEIMER, H. (1980): Einfluß der Oberflächenstrukturen von Filtermaterialien auf die Partikelabscheidung in Tiefenfiltern. – Vom Wasser, **55:** 131-147, Weinheim.

GOUY, M. (1910): Sur la constitution de la charge électrique á la surface d'un électrolyte. – J. phys. théoretique et appliquée, **9:** 457-468, Paris.

GRATON, L. C. & FRASER, H. J. (1935): Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. – J. Geol., **43:** 785-909, Chicago, Ill..

GRUESBECK, C. & COLLINS, R. E. (1982): Entrainment and deposition of fine particles in porous media. – Soc. Petrol. Eng. J., SPE 8430: 847-856, Richardson, Tx..

HAGEN, G. (1839): Über die Bewegung des Wassers in cylindrischen Rohren. – Ann. Physik Chemie, **46:** 423-442, Leipzig.

HANTUSH, M. S. (1964): Hydraulics of wells. – Advances of Hydroscience, Vol. 1: 281-332, 31 Abb., 9 Tab., New York.

HARTGE, K. H. (1964): Die Bestimmung von Porenvolumen und Porengrößenverteilung. – Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung: 164-206, 4 Abb.

HAZEN, A. (1892): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. – 24th annual report state board of health mass: 541-556, 4 Abb., 7 Tab., Boston, Mass.

HEITELE, H., HEYL, K. E., KÄRCHER, T. & STAHMER, G. (1987): Der Oberrheingrabenrand zwischen Bad Dürkheim und Grünstadt (Unterhaardt); Exkursion A am 21. April 1987. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F. **69:** 43-52, 4 Abb., Stuttgart.

HÖLTING, B. (1989): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 396 S., 109 Abb., 39 Tab., Stuttgart: Enke.

HUBBE, M. A. (1984): Theory of detachment of colloidal particles from flat surfaces exposed to flow. – Coll. and Surface, **12,** 151 S.

HUNTER, R.J (1981): Zeta potential in colloid science, principles and applications. – London: Academic Press.

HUTCHEON, I. & GOLDENBERG, L. C. (1987): Migration of kaolinite and smectite fines in aqueous solutions and the role of gas bubbles. – Presented at the 12th AOSTRA/ University/ Industry Tech. Review Meet. and Seminar, Banff, Alberta, October 14-16.

IWASAKI, T. (1937): Some notes on sand filtration. – J. Amer. Water Works Assoc., **29 (10):** 1591-1602, New York.

JACOB, C. E. (1950): Flow of ground water. – In: ROUSE, H.: Engineering hydraulics, 321-386, New York.

KÉZDI, A. (1964): Bodenmechanik, Bd. 1, 424 S., Berlin: VEB-Verlag für Bauwesen.

KHILAR, K. C. & FOGLER, H. S. (1983): Water sensitivity of sandstones. – Soc. Pet. Eng. J., **23:** 51.

KHILAR, K. C. & FOGLER, H. S. (1984): The existence of a critical salt concentration for particle release. – J. Coll. and Interface Science, **101** (1): 214-224.

KIA, K. C. & FOGLER, H. S., REED, M. G. & VAIDYA, R. N. (1987): Effect of salt composition on clay release in Berea sandstones. – SPE Prod. Eng. 15318: 277-283, Richardson, Tx..

KIA, K. C. & FOGLER, H. S., REED (1987): Effect of pH on colloidally induced fines migration. – J. Coll. and Interface Science, **118** (1): 158-168.

KNOKE, H. (1992): Gesteinsphysikalische Eigenschaften von Fest- und Lockergesteinen und ihre Umsetzung als Regelwerk für ein Expertensystem. – Ber. Geol. – Paläont. Inst. Univ. Kiel, Nr. 54, 122 S., 72 Abb., 22 Tab., Kiel.

KOZENY, J. A. (1928): Die Durchlässigkeit des Bodens. – Kulturtechniker, **35:** 478-486, Breslau.

KRÖMMELBEIN, K. (1991): Brinkmanns Abriß der Geologie, Zweiter Band: Historische Geologie. – 404 S., 70 Abb., 63 Fossiltabellen, 21 strat. Übersichten, Stuttgart: Enke.

LANGGUTH, H. R. & VOIGT, R. (1980): Hydrogeologische Methoden. – 86 S., 156 Abb., 72 Tab., Berlin: Springer.

MAIER, D. & GROHMANN, A. (1977): Bestimmung der Ionenstärke aus der elektrischen Leitfähigkeit. – Z. Wasser Abwasser Forsch., **10** (1): 9-12, 1 Abb., 1 Tab., München.

MAROTZ, G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. – Mitt. Inst. Wasserwirtschaft, Grundbau u. Wasserbau, **9,** 228 S., Stuttgart.

MATTHES, G. & UBELL, K. (1983): Lehrbuch der Hydrogeologie. Bd. 1: Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. – 438 S., 214 Abb. 75 Tab., Berlin, Stuttgart: Borntraeger.

MUECKE, T. W. (1978): Formation fines and factors controlling their movement in porous media. – J. Petrol. Geol., SPE 7007: 144-150, Richardson.

MÜLLER, G. (1967): Sediment-Petrologie, Teil 1: Methoden der Sediment-Untersuchung. – 437 S., Stuttgart: Schweizerbart.

NASR-EL-DIN, H. A., MAINI, B.B. & STANISLAV, P. (1991): Fines migration in unconsolidated sand formations. – Aostra J. Res., **7** (1), 1-15, Edmonton, Alberta.

NEASHAM, J. W. (1977): The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and ist effects on the sandstone shaliness, pore space and fluid flow properties. – Soc. Petrol. Eng. J., SPE 6858; 1-8, Richardson, Tx.

NEUMANN, B. (1983): Untersuchungen zur Elektrophorese als Transportmechanismus bei der Tiefenfiltration. – Dissertation, 169 S., Karlsruhe.

OKADA, K., AKADI, Y., KOGURE, M. & YOSHIOKA, N. (1990): Effect on surface charges of bubbles and fine particles on air flotation process. – Can. J. Chem. Eng., **68:** 343 ff..

O'MELIA, C. R. & ALI, W. (1978): The role of retained particles in deep bed filtration. – Prog. Wat. Tech., Vol. **10 (5/6):** 167.

POISEULLE, J. L. M. (1839): Recherches sur les causes du mouvement du sang dans les vaisseaux capillaires. – 80 S., Paris: Impr. royale.

RAGAN, G. (1989): Flow and transport in porous formations. – 465 S., 113 Abb., Berlin: Springer.

REYNOLDS, O. (1883): An experimental investigation of the circumstances which determine whether motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. – Phil. Trans. Royal Soc. London, **174,** Series A: 935-982, London.

SCHÄFER, T. (1994): Laboruntersuchungen zur hydrodynamischen Mobilisation von Feinstpartikeln in Festgesteinproben der Haardtrandfazies des Pfälzer Buntsandsteins. – Unveröffentliche Diplomarbeit, 135 S., 16 Tab., 68 Abb., Mainz.

SCHEFFER, P. & SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. – 491 S., 220 Abb., 102 Tab., 1 Farbtafel, Stuttgart: Enke.

SCHIELER, W. (1992): Raum Bad Dürkheim. – Unveröffentlichte Diplomkartierung, Universität Mainz.

SHARMA, M. M. & YORTSOS, Y. C. (1986): Permeability impairment due to fines migration in sandstones. – Soc. Petr. Eng., Spe 14819: 91-103.

SIGG, L. & STUMM, W. (1991): Aquatische Chemie. – 388 S., Stuttgart: Teubner.

TERZAGI, K. von (1925): Principles of final soil classification. – Public roads, 41-53, Washington, D. C.

TODD, D. K. (1960): Ground water hydrology. – 336 S., New York: Wiley & Sons.

TUCKER, M. E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. – 265 S., 219 Abb., 20 Tab., Stuttgart: Enke.

VAN OLPHEN, H. (1963): An introduction to clay colloid chemistry. – 301 S., New York: Wiley & Sons.

WALZENBACH, J. (1991): Mineralöle in Locker- und Festgesteinen, Untersuchungen zur Durchlässigkeit, Saugspannung und Kapillarität. – Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, **12:** 1-152, Karlsruhe.

YAO, K. –M. (1968): Influence of suspended particle size on the transport aspect of water filtration. – Dissertation, University of North Carolina, Chapel Hill, N. C.

YAO, K.-M., HABIBIAN, M. T. & O'MELIA, C. R. (1971): Water and waste water filtration: Concepts and applications. – Enviromental Science and Technology, **5, 11:** 1105-1122, Washington, D. C.

ZIESCHANG, J. (1961): Zur zulässigen Höchstbelastung eines Brunnens. – Z. angew. Geol., **7:** 580-582, 1 Abb., 2 Tab., Berlin.

(Bei der Schriftleitung eingegangen am 29. 8. 1995)

Anschrift des Autors:
Dipl.-Geol. Thorsten Schäfer, Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität, 55099 Mainz.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Mitteilungen der POLLICHIA

Jahr/Year: 1995

Band/Volume: 82

Autor(en)/Author(s): Schäfer Thorsten

Artikel/Article: Laboruntersuchungen zur hydrodynamischen Mobilisation von Feinstpartikeln in Festgesteinsproben der Haardtrandfazies des Pfälzer Buntsandsteins 37-80