

Maßstabsübergreifende hydraulische Untersuchungen an Sanden des Baden im Oststeirischen Becken

A. HELFER¹

¹Zusammenfassung der Masterarbeit von Alexander Helfer, erschienen 2017 am Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Austria; Alexander Helfer, alexander.helfer@hotmail.com

Einleitung/Motivation

Im nördlichen oststeirischen Becken spielen Tiefengrundwässer, die besonders in den Schichten des Baden und Sarmat auftreten, eine große Rolle in der Wasserversorgung dieser Region. Durch das obertägige Ausstreichen dieser Sedimente im Norden ermöglichen diese Schichten eine rezente Grundwasserneubildung, besonders durch ihre hohe Durchlässigkeit und das Einfallen der Schichten nach Süden haben sie auch eine wichtige Bedeutung als Wasseranreicherungsgebiet für das gesamte Aquifersystem im oststeirischen Becken (Domberger et al., 2005). Eine genaue hydraulische Charakterisierung dieser geologischen Einheiten spielt daher nicht nur lokal eine Rolle, sondern ist für das gesamte Aquifersystem des oststeirischen Beckens von Bedeutung. Böden und Sedimente sind entscheidende Elemente im hydrologischen Zyklus, da sie das Medium sind, durch das der infiltrierende Niederschlag zum Aquifer sickert. Gleichzeitig können Bodenhorizonte und flache Stratigraphie als hydraulische Barrieren wirken, die den oberflächigen oder den Zwischenabfluss im Boden fördern und eine tiefe Infiltration erschweren. Für die meisten Einzugsgebiete ist wenig über die kleinräumige horizontale und vertikale Variabilität der hydrologischen Eigenschaften des Bodens bekannt. Solche Informationen sind jedoch erforderlich um detaillierte Bodenwasser-Fließwege zu berechnen und kleinräumige Variabilität in Grundwasserneubildung und Abfluss zu schätzen (Beerten et al., 2012). Die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit ist jedoch nicht immer einfach, da die Messergebnisse von vielen Faktoren wie Messmethode oder Messskala abhängen. Dabei spielen besonders die ausgewählte Messmethode und das Probenvolumen bzw. die Probenfläche eine große Rolle.

Im Laufe der Zeit wurden zahlreiche In-Situ und Labormethoden zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit entwickelt (z.B.: Zhang, 1997; Reynolds & Elrick 1985; Perroux & White 1988; Plagge et al. 1990; Rodgers & Mulqueen 2006). Als zuverlässig gelten für gewöhnlich die Labormethoden, da umgebende Einflussfaktoren keine Rolle spielen und nur die Gültigkeit der von Darcy (1856), Buckingham (1907) oder Richards, L., A.(1931) postulierten Gleichungen bei der Bestimmung eine Bedeutung haben, obwohl Probenentnahme und Transport möglicherweise einen undefinierbaren Fehlerfaktor in den Labormessungen bewirken.

Einen speziellen Einfluss auf die Verlässlichkeit der Messergebnisse haben besonders die Wahl der Methode sowie das Probenvolumen, welches auf die Durchlässigkeit untersucht wird. Verschiedene Probenvolumina können unterschiedliche Ergebnisse für die hydraulische Durchlässigkeit desselben Mediums liefern. Dieser Effekt ist nicht nur abhängig von der gewählten Methode, sondern kann auch bei identer Messmethode aber unterschiedlichen Probengrößen auftreten. So ist z.B. die Infiltrationsrate bei Versuchen mit Ringinfiltrometern auch vom Durchmesser des Ringes abhängig. Diese Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit stellt insofern ein Problem dar, da die

gemessenen hydraulischen Eigenschaften der Laborskala nicht einfach auf die Eigenschaften von Feld- oder Regionalskala übernommen werden können und umgekehrt.

Das Thema der hydraulischen Eigenschaften im Untergrund wurde schon von zahlreichen Wissenschaftlern behandelt. Als Fazit kann gesagt werden, dass es in heterogenen Medien eine eindeutige Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit gibt. In allen wissenschaftlichen Arbeiten konnte eine kontinuierliche Zunahme der Durchlässigkeit mit ansteigender Skala festgestellt werden.

In anderen Arbeiten konnte zusätzlich die Skalenabhängigkeit anderer bodenhydraulischer Kenngrößen erkannt werden. Mit ansteigender Skala erhöht sich nicht nur die hydraulische Durchlässigkeit, sondern auch die effektive Porosität (Fallico et al. 2010), der Speicherkoeffizient (Fallico et al., 2012) und die Dispersivität (Schulze-Makuch & Cherkauer, 1995; 1997, 1998). Die Skalenabhängigkeit dieser Parameter kann auch mit einem ähnlichen Potenzgesetz beschrieben werden. Allerdings wären weitere Untersuchungen dieser Einflussgrößen im Zusammenhang mit der Messskala notwendig um ihre Skalenabhängigkeit bestätigen und auch begründen zu können. Rovey & Cherkauer (1995) zeigen in deren Arbeit, dass auch ein direkter Zusammenhang zwischen dem Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeit und der Varianz besteht.

Um zu bestimmen ob ein solcher Einfluss der Messskala auch bei der hydraulischen Charakterisierung der Sandschichten des Baden besteht, wurden Versuche mit verschiedenen Messmethoden auf verschiedener Messskala durchgeführt. Mittels Ringinfiltrimeter, Stechzylinderproben und einem tragbaren Luftpermeameter wurden sowohl die vertikale als auch die horizontale feldgesättigte Durchlässigkeit bestimmt.

Geologie

Das steirische Becken befindet sich am östlichen Rand des Ostalpins und bildet mit einer Länge von etwa 100 km und einer Breite von 50 km die Fortsetzung des Westpannonischen Beckens. Das Becken wird durch die Mittelsteirische Schwelle in das seichtere Weststeirische Becken und das etwa 4 km tiefe Oststeirische Becken geteilt und von der Südburgenländischen Schwelle vom Westpannonischen Becken getrennt (Abbildung 1). Gegliedert wird das Becken in das Weststeirische Becken, Murecker Becken, Gnaser Becken und das Fürstenfelder Becken (Sachsenhofer et al., 1997).

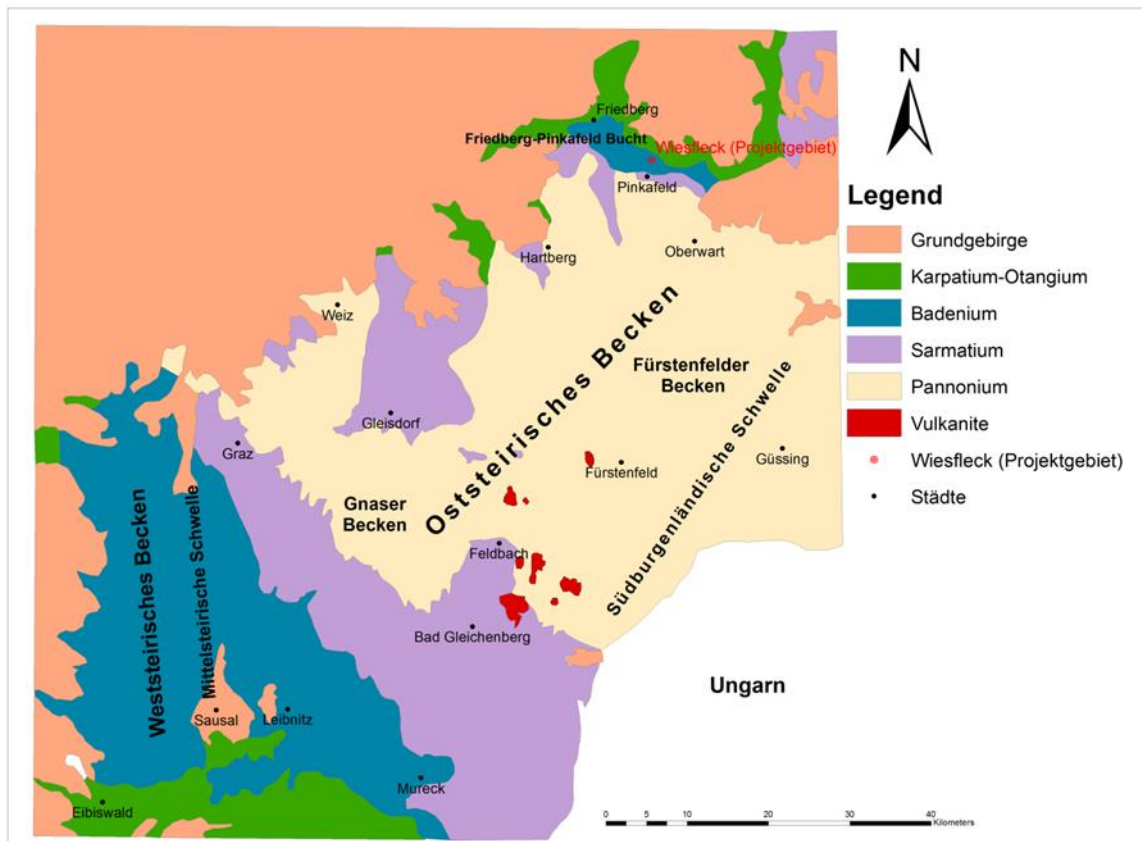


Abbildung 1: Geologische Karte des Steirischen Beckens (vereinfacht nach GROSS et al. 2007).

An der Grenze Karpatium-Badenium endete die differenzierte Sedimentation in den verschiedenen Teilbecken durch eine Absenkung die das gesamte Becken betraf. An der Basis des Badenium führte das Verkippen der Krustenblöcke (Steirische Phase) und die anschließende Erosion zu ausgedehnten Diskordanzen (Ebner & Sachsenhofer, 1991). Am Beginn des Badenium kam es zu einer weitreichenden marinen Überflutung durch einen eustatischen Meeresspiegelanstieg der zentralen Parathetys und große Teile des Oststeirischen Beckens unterlagen einer marinen Sedimentation (Ebner & Sachsenhofer, 1995) (Abbildung 2). Während des Badeniums begann der Vulkanismus welcher im Karpatium im Süden des Beckens begann immer weiter nach Norden zu wandern (Ebner & Sachsenhofer, 1991). Die marinen Verhältnisse drangen bis weit in die Friedberg-Pinkafeld Bucht vor und wurden in Form der Tauchen Formation abgelagert. In der Nähe von Wiesfleck und Tauchen entwickelte sich eine sandige Beckenfazies wobei am Westrand eine Deltafazies dominiert (Domberger et al., 2005).

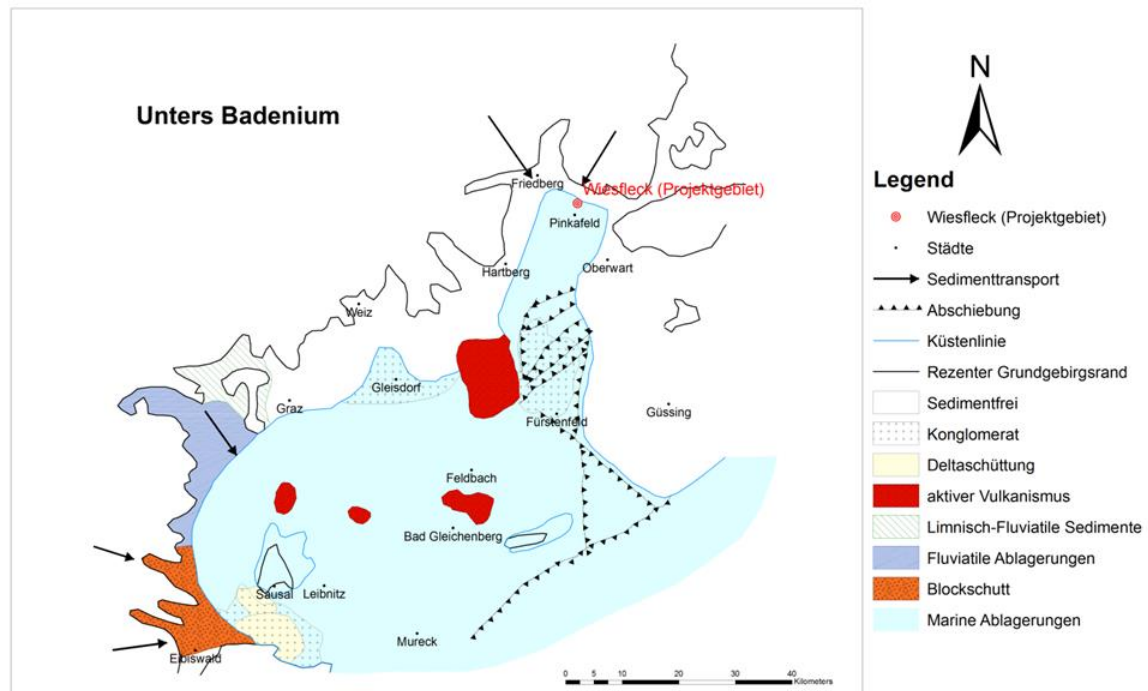


Abbildung 2: Paläogeographie im unteren Badenium (nach EBNER & SACHSENHOFER 1995). Ausbreitung der marinen Sedimentation bis weit in die Friedberg –Pinkafeld Bucht.

Ebner und Sachsenhofer (1995) teilten anhand ihrer eigenen und anderen wissenschaftlichen Arbeiten über das steirische Becken (Ebner, 1988; Friebe, 1990; Friebe, 1991; 1993) den marinen Sedimentationsbereich in 5 verschiedenen Fazies-Zonen ein:

- I. Deltasedimente mit Kohleeinlagerungen und Schichten aus vulkanischer Asche am Nordostrand des Beckens welche Tauchenformation genannt wird.
- II. Marine Konglomerate des Fürstenfelder- und Gnaser Becken.
- III. Siltig-tonige Sedimente im zentralen und südöstlichen Becken.
- IV. Leithakalk (Weißenegg Formation) am Rand der Mittelsteirischen Schwelle und als Umrandung der vulkanischen Inseln. Anhand dieser konnten 3 Regressions-/Transgressionszyklen festgestellt werden.
- V. Siliziklastische Sedimente im weststeirischen Becken (St. Florian Formation)

Am Ende des Badeniums führte ein Meeresspiegel-Tiefstand zu Erosionslücken im östlichen Teil des Beckens und zu einer Progradation von Delta und fluviatilen Sedimenten im nordwestlichen Beckenbereich (Friebe, 1990).

Methodik

Um eine maßstabsübergreifende hydraulische Charakterisierung und die damit einhergehende Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit zu bestimmen, wurden Methoden verschiedener Messskalen angewendet. Die Skalen bewegen sich dabei in einem Maßstab von Millimeter für das Handpermeameter, Zentimeter für Stechzylinder welche mittels Constant Head Permeameter ausgewertet wurden und bis zu 6 Dezimeter für die Versuche mit dem Ringinfiltrrometer.

Die Auswertung der generierten Daten erfolgte mittels folgender Methoden:

- Tiny Perm
Auswertung der Daten anhand der von Vindum Engineering bereitgestellten Umrechnungsformel und nach Iversen et al. (2003)
- Constant Head Permeameter
Auswertung nach Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2013)
- Einzelringinfiltrrometer
Auswertung nach Reynolds & Elrick (1990)
- Statistische Auswertung der Daten mittels Statistikprogramm „R“

Projektgebiet

Das Projektgebiet befindet sich ca. 2km nordöstlich von Pinkafeld in der Ortschaft Wiesfleck. Im Norden von Wiesfleck befindet sich eine Sand- und Schottergrube der Firma Ulreich. Aufgrund der Abbauarbeiten liegen hier Sande und Schotter des Badeniums mit einer Mächtigkeit von etwa 30 m vor. Die Ablagerungen zeigen eine Schichtung mit einer Wechsellagerung aus Schottern und fein- bis mittelkörnigen Quarzsanden welche mit 5-10° in Richtung Süden einfallen.

Im Hangenden beginnt der Aufschluss mit einer Schicht aus Schotter dessen Mächtigkeit etwa 3 m beträgt. Darunter folgt eine Schicht aus feinsandigem Material dessen Mächtigkeit mit maximal 3 m am höchsten ist und in Richtung SW abnimmt. Darauf folgt wieder eine 5 m mächtige Schicht aus Schotter welche wieder in einen mittelkörnigen Sand übergeht und die restliche Mächtigkeit der Sandgrube einnimmt (Abbildung 3). Der gesamte Aufschluss wird von einem System aus steil einfallenden Störungen durchzogen, deren Streichrichtungen in etwa dem Störungslinament des Oststeirischen Beckens entsprechen.

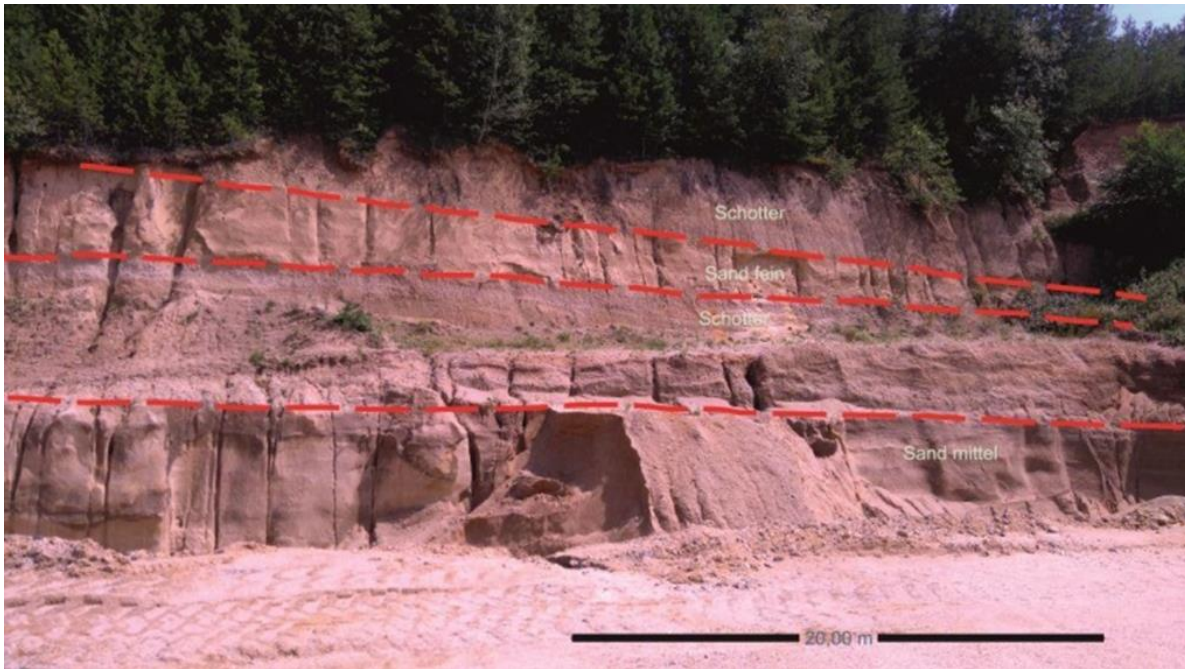


Abbildung 3: Schichtung der Sedimente in der Sandgrube Ulreich. Von Liegend nach Hangend: Sand mittelkörnig – Schotter – Sand feinkörnig – Schotter.

Messung und Probennahme

Zur hydraulischen Charakterisierung wurde nur der mittelkörnige Sand im Liegenden des Aufschlusses herangezogen. Hier wurden zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Durchlässigkeit an einem 3-dimensional aufgeschlossenen Bereich Stechzylinder genommen und Messungen mittels Tiny Perm und Ringinfiltrrometer durchgeführt. Dieser Aufschluss ermöglicht es die Messungen für die horizontale Durchlässigkeit an einer SW-NO und einer OSO-WNW verlaufenden Wand durchzuführen. Für die vertikale Durchlässigkeit konnten Messungen an einer direkt darüberliegenden horizontalen Fläche gemacht werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

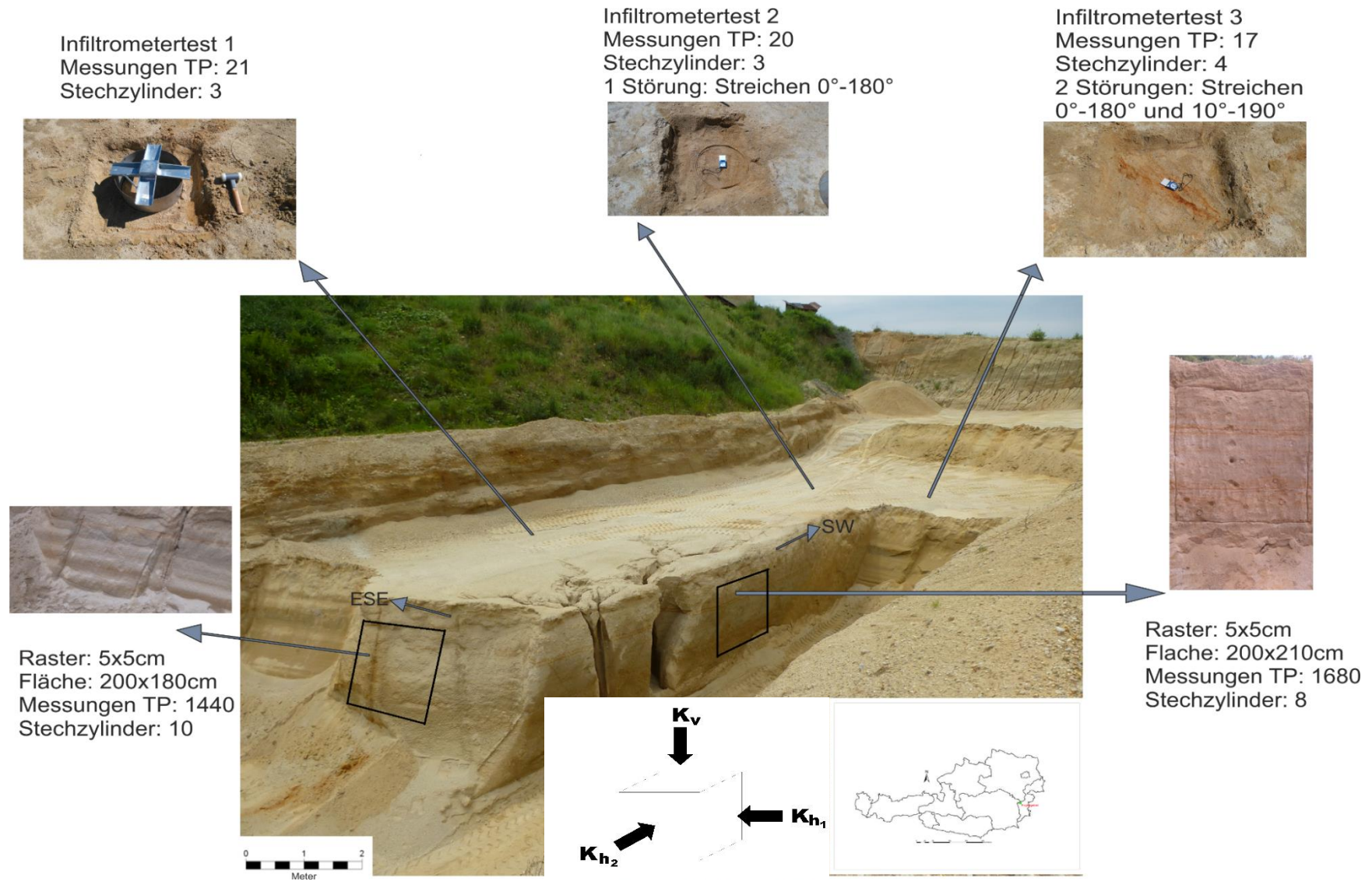


Abbildung 4: Übersicht der ausgewählten Messareale und Messmethoden. Kleine Abbildungen zeigen die Detailaufnahmen der Messbereiche sowie die Anzahl der Messungen und die Messmethode an den gewählten Punkten. Der Würfel zeigt eine Skizze der 3 verschiedenen Richtungen in welche gemessen wurde. K_v = vertikale Durchlässigkeit, K_h = horizontale Durchlässigkeit

Ergebnisse

Heterogenität der hydraulischen Durchlässigkeit

Abbildung 5 zeigt links die Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit, die mittels Krigging auf Basis der Tiny Perm Daten interpoliert wurde, und rechts ein Foto des aufgenommenen Bereichs der SW-NO Wand. Der Verlauf und die geringere Durchlässigkeit der Störung sind in der Durchlässigkeitsverteilung (Abbildung 5 links) gut erkennbar. Des Weiteren ist zu erkennen, dass im Messbereich kleinräumige Zonen höherer Durchlässigkeit (gelbe Bereiche: von $3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ bis $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$) und Zonen geringerer Durchlässigkeit (violette Bereiche: von $3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ bis $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) auftreten. Eine Analyse der Stechzylinder wäre hier hilfreich um festzustellen ob es sich hier um kleine Linsen anderer Kornverteilung handelt oder ob die Bereiche geringerer Durchlässigkeit eine höhere Lagerungsdichte aufweisen.

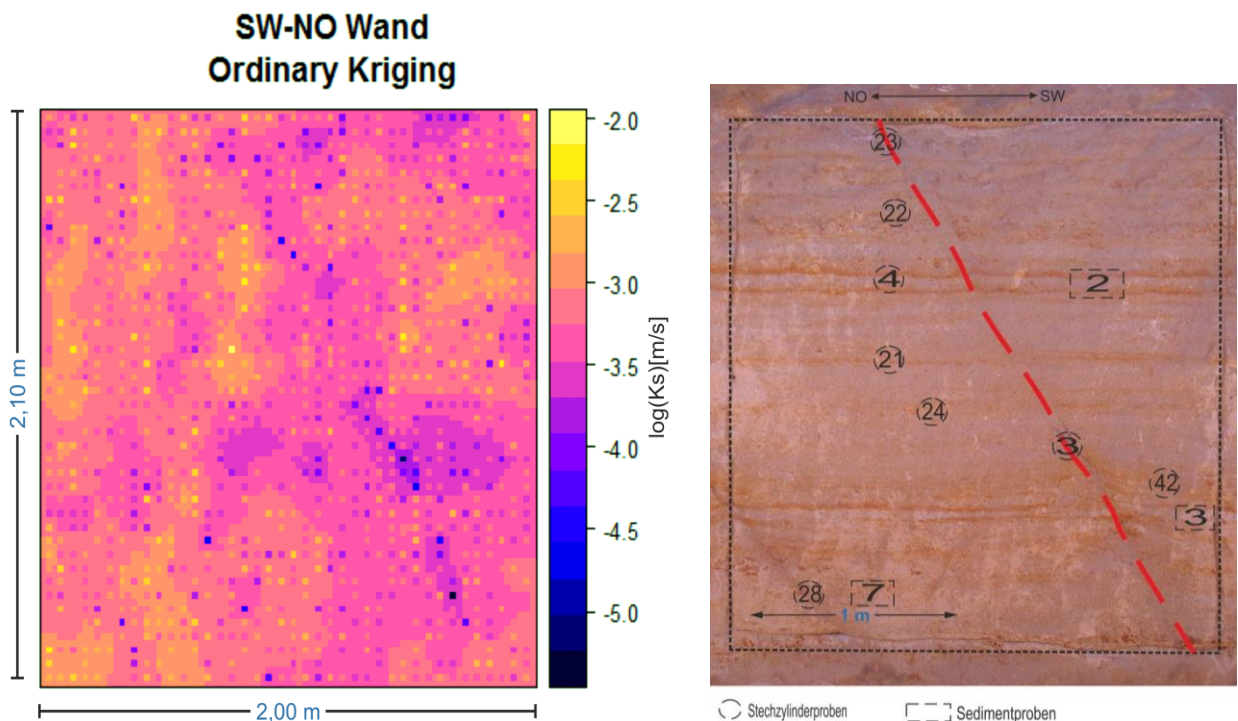


Abbildung 5: Links: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit mittels Krigging der SW-NO Wand. Rechts: Foto des Messbereichs der SW-NO Wand als Vergleich.

Die Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit zeigt, dass die Durchlässigkeit der OSO-WNW ausgerichteten Wand (Abbildung 5) im Vergleich zur SW-NO ausgerichteten Wand über den gesamten Bereich im Mittel eine geringere Durchlässigkeit aufweist. Die horizontale eingefärbte Schichtung (Limonitisierung) welche im Aufschluss ersichtlich war, kann in der Durchlässigkeitsverteilung nicht erkannt werden. Wodurch diese Schichtung entstand, kann ohne weitere Analysen der Sedimentproben nicht gesagt werden. Ein besonders gering durchlässiger Bereich in der ESE-WNW Wand kann in der unteren linken Hälfte und im obersten mittleren Abschnitt des Messbereiches beobachtet werden (Abbildung 6 links). Für die linke untere Hälfte kann optisch keine Ursache für die geringere Durchlässigkeit festgestellt werden. Die Ursache für die geringe Durchlässigkeit im oberen Bereich könnte in einer veränderten Kornverteilung liegen. Das Foto des Messbereiches (Abbildung 6) zeigt, dass sich dieser Bereich farblich von den anderen

Sedimenten des Messbereichs unterscheidet. Vermutlich wird dieser farbliche Unterschied durch einen größeren Anteil von feinkörnigem Material verursacht.

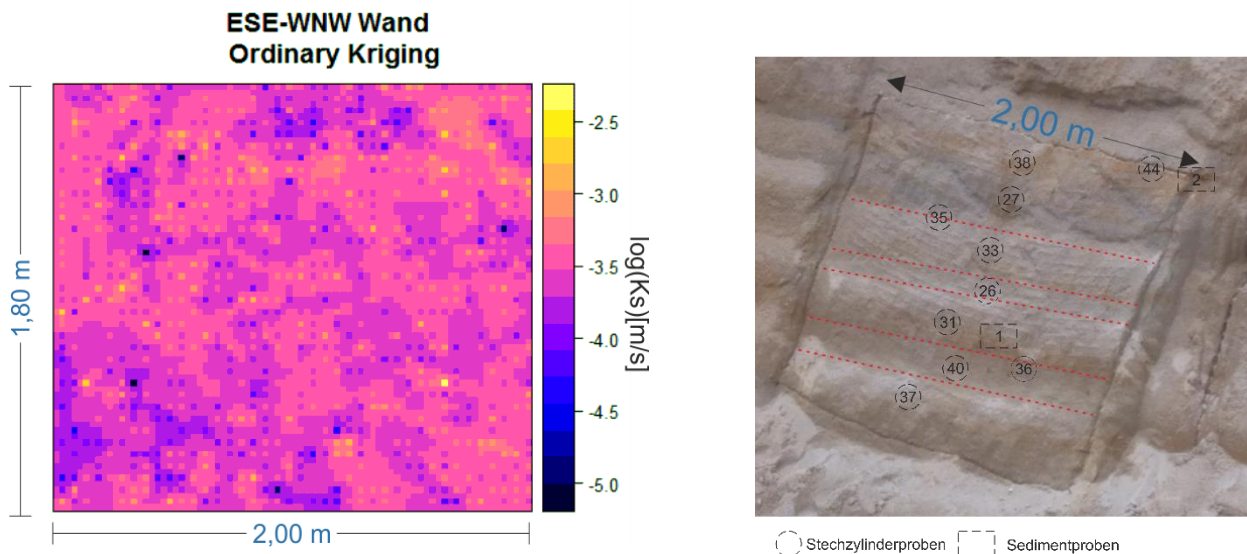


Abbildung 6: Links: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit mittels Krigging der OSO-WNW Wand. Rechts: Foto des Messbereichs der SW-NO Wand als Vergleich.

Skalenabhängigkeit

Eine Analyse der Messergebnisse auf ihre Skalenabhängigkeit hat ergeben, dass im Bearbeitungsgebiet diese, so wie sie von Schulze-Makuch et al. (1999) beschrieben wurden, nicht nachgewiesen werden kann. Dabei wurde das geometrische Mittel der drei Methoden herangezogen welche zur Bestimmung der vertikalen Durchlässigkeit verwendet wurden. Abbildung 7 zeigt, dass es zwar unter den Methoden zu Schwankungen der Ergebnisse kommt, jedoch zu keiner eindeutigen Zunahme der Durchlässigkeit mit ansteigender Skala. Eher zeigt sich ein umgekehrter Trend, da die hydraulische Durchlässigkeit mit steigender Skala abnimmt. Wie Schulze-Makuch et al. (1999) erwähnen, tritt in einem homogenen Medium kein Skaleneffekt auf. Der im Untersuchungsgebiet aufgeschlossene sehr homogene mittelkörnige Quarzsand könnte der Grund sein, dass kein Skaleneffekt zu beobachten ist. Anscheinend ist durch das sehr homogene Material ein Repräsentatives Elementarvolumen schon auf sehr kleiner Skala erreicht.

Skalenabhängigkeit der hydr. Durchlässigkeit

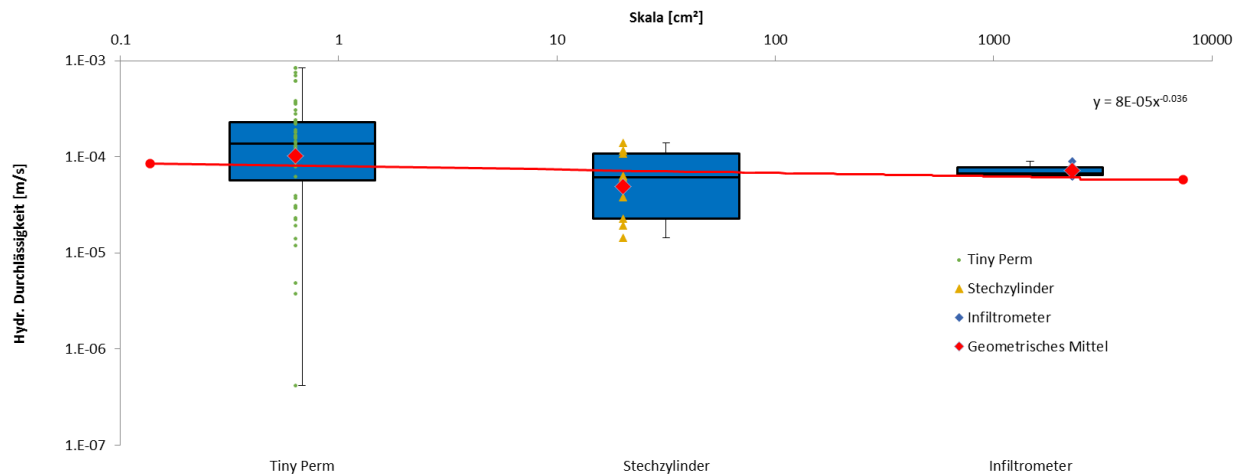


Abbildung 7: Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit.

Auch in den anderen Messbereichen in denen ein Vergleich von Tiny Perm und Stechzylinder gemacht wurde, folgt und die hydraulische Durchlässigkeit nicht dem von Schulze-Makuch et al. (1999) postulierten „Scale-Law“. Allgemein zeigen die Ergebnisse einen umgekehrten Trend, in dem es mit steigendem Testvolumen zu einer Abnahme der Durchlässigkeit kommt (siehe Abbildung 7). Nur an der OSO-WNW ausgerichteten Wand zeigen die Ergebnisse aus Stechzylinder und Tiny Perm Untersuchungen dieselbe hydraulische Durchlässigkeit. Ob die tendenzielle Abnahme der Durchlässigkeit ein Effekt der Messskala oder ein Effekt der Messmethode ist kann an dieser Stelle nicht gesagt werden.

Vermutlich liegt die Abnahme der Durchlässigkeit daran, dass mit steigender Skala ein größerer Teil der weniger durchlässigen Störungen miteinbezogen wird. Ein Skaleneffekt könnte so, je nach Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes nicht nur in einer Zunahme der Durchlässigkeit mit steigender Skala resultieren, sondern wie in diesem Falle auch in einer Abnahme.

Im Arbeitsgebiet werden mit steigender Skala immer mehr Störungen in das Messergebnis miteinbezogen, ein Sinken der mittleren Durchlässigkeit ist daher logisch. Am Beispiel der Messungen welche an der OSO-WNW ausgerichteten Wand bei Infiltrometersversuch 1 gemacht wurden, in denen keine Störungen miteinbezogen wurden, zeigen unabhängig von der Methode, dasselbe Messergebnis. In Infiltrometersversuch 2 und 3 sowie an der SW-NO ausgerichteten Wand, an denen Störungen in die Messungen miteinbezogen wurden, zeigt sich mit ansteigender Skala eine Abnahme in der hydraulischen Durchlässigkeit. Folglich wäre es auch möglich, dass der Exponent des „Maßstabgesetzes“ (z.B. Schulze-Makuch et al., 1999) nicht zwingend einen positiven Wert annehmen muss. Um dies zu bestätigen wären jedoch weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Testvolumina notwendig.

Interpretation und Ausblick

Die Ergebnisse der Messungen zur gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit ergeben, dass die Sande des Badeniums eine hoch durchlässige Zone der tertiären Sedimente des steirischen Beckens darstellen. Damit können sie Infiltrationszonen für die seichten Grundwässer des Umgebungsgebietes und für die Tiefengrundwässer des gesamten Oststeirischen Beckens sein.

Zusammenfassend kann durch die Messergebnisse eine starke Richtungsabhängigkeit der Durchlässigkeit festgestellt werden. Im Mittel ist die horizontale Durchlässigkeit in Richtung NW-SO mit $5,75 \times 10^{-4} m/s$ am höchsten. Dies steht vermutlich damit in Verbindung, dass auch die Schüttung dieser Sedimente im Badenium in dieser Richtung erfolgte (vgl. Abbildung 2). Das Ergebnis in Richtung SSW-NNO liegt hingegen bei $2,95 \times 10^{-4} m/s$. Für die vertikale Durchlässigkeit wurde der geringste Wert mit $1,15 \times 10^{-4} m/s$ festgestellt. Die geringere hydraulische Durchlässigkeit in vertikale Richtung könnte auf die Verdichtung der oberflächennahen Sedimente durch Arbeiten mit schwerem Gerät in der Sandgrube zurück zu führen sein.

Die Auswertung der hydraulischen Durchlässigkeit der Störungen ergibt, dass diese im Schnitt um einen Faktor 10 geringer durchlässig sind als die ungestörten Sedimente. Durch die Infiltrometerversuche konnte kein Effekt der Störungen auf die mittlere vertikale hydraulische Durchlässigkeit nachgewiesen werden. Vermutlich haben die Störungen durch ihr steiles Einfallen und den damit verbundenen sehr kleinen Anteil der Infiltrationsfläche einen nicht registrierbaren Einfluss für diese Testvolumina. Ein Effekt auf das Gesamtverhalten des hydraulischen Systems kann aber nicht ausgeschlossen werden. Durch ihren stauenden Effekt könnten sie sehr wohl ein steuerndes Element für den Grundwasserfluss darstellen.

Die Ausarbeitung der Skalenabhängigkeit im Arbeitsgebiet hat ergeben, dass diese wie von Schulze-Makuch et al. (1999) beschrieben nicht auftritt. Die Möglichkeit des Vergleiches aller drei Methoden hat sich nur bei den Messungen der vertikalen Durchlässigkeit angeboten. Hier ergab jedoch die Methode mit der kleinsten Skala die höchste Durchlässigkeit. Sowohl die Ergebnisse der Stechzylinderproben als auch die der Infiltrometerversuche zeigen eine geringere Durchlässigkeit. Auch an den Ergebnissen der horizontalen Durchlässigkeit kann dieser Effekt festgestellt werden, allerdings konnten hier nur Ergebnisse aus Tiny Perm und Stechzylinderproben verglichen werden. Im Allgemeinen kann eher eine Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmenden Testvolumen festgestellt werden. Vermutlich steht dieser Trend in Zusammenhang mit dem gering durchlässigen Störungsmaterial. Bei Zunahme des Testvolumens wird immer mehr dieses Materials in die Messung miteinbezogen und es kommt daher zu einer Abnahme der mittleren hydraulischen Durchlässigkeit.

Ein Wert für die hydraulische Durchlässigkeit im regionalem Maßstab konnte aus Domberger et al. (2005) entnommen werden. Hier wurde aus einem Pumpversuch in Wiesfleck für die Durchlässigkeit ein Wert von $2,55 \times 10^{-4} m/s$ ermittelt. Vergleicht man diesen Wert mit dem der horizontalen hydraulischen Durchlässigkeit wird ersichtlich, dass offensichtlich kein Skaleneffekt auftritt.

Der Trend der Abnahme der Durchlässigkeit tritt vermutlich nur bei kleinräumigen Testvolumina, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden, auf. Hier haben die Werte einen großen Einfluss auf die mittlere hydraulische Durchlässigkeit, welcher jedoch bei großen Skalen anscheinend wieder vernachlässigbar klein wird. Dies zeigt auch das Ergebnis der OSO-WNW ausgerichteten Wand

welche sehr homogen erscheint und ohne Störung ist. Hier tritt kaum ein Unterschied zwischen Tiny Perm und Stechzylinder auf und das Ergebnis entspricht auch demjenigen des Pumpversuches. Die Annahme, dass es in einem homogenen Medium keinen Skaleneffekt gibt, kann bestätigt werden, wenn man große Skalen miteinbezieht. Da aber rein homogenes Material in der Natur nicht vorkommt, kann es bei Skalen welche nur bis in den Meterbereich reichen durch kleinräumige Heterogenitäten, wie sie in dieser Arbeit die Störungen darstellen, sehr wohl zu einem Skaleneffekt kommen. Bei diesem kleinräumigen Skaleneffekt scheint aber nicht nur eine Zunahme, sondern auch eine Abnahme der Durchlässigkeit mit steigender Skala möglich zu sein.

Referenzen

- Beerten K., Vandersmissen N., Rogiers B., Mallants, D. (2012): Assessing soil hydrological variability at the cm- to dm-scale using air permeameter measurements. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14.
- Buckingham E. (1907): Studies on the movement of soil moisture. U.S. Department of Agriculture, Bureau of soils Bulletin No 38, Washington Government Printing Office.
- Darcy H. (1856): Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. p 647, Dalmont, Paris.
- Domberger G., Erhart-Schippke W., Kriegl C., Meyer J., Niederbacher P., Schreilechner M., Vasvari V. (2005): Hydrogeologische Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung der Tiefengrundwässer im Bereich des Oststeirischen und Pannonischen Beckens - (NANUTIWA). Joanneum Research. Graz.
- Ebner F., (1988): Das Paläozoikum in den RAG-Bohrungen. Blumau 1, 1a und Arnwiesen 1 (Oststeirisches Tertiärbecken). *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 131 (4), 563–573.
- Ebner F., Sachsenhofer R.F. (1991): Die Entwicklung des steirischen Tertiärbeckens. *Mitteilungen der Abteilung für Geologie und Paläontologie am Landesmuseum Joanneum* (49).
- Ebner F., Sachsenhofer R. F. (1995): Palaeogeography, subsidence and thermal history of the Neogene Styrian Basin (Pannonian basin system, Austria). *Tectonophysics* 242 (1-2), 133–150.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2015): Doppelring-Infiltrometer. Gebrauchsanweisung. Niederlande.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2013): Laboratory-Permeameters. Operating Instructions. Eijkelkamp Soil & Water. Niederlande, Giesbeek.
- Fallico C., Bartolo S., Troisi S., Veltri M. (2010): Scaling analysis of hydraulic conductivity and porosity on a sandy medium of an unconfined aquifer reproduced in the laboratory. *Geoderma* 160 (1), 3–12.
- Fallico C., Vita M. C., Bartolo S., Straface S. (2012): Scaling Effect of the Hydraulic Conductivity in a Confined Aquifer. *Soil Science* 177 (6), 385–391.
- Friebe J.G. (1990): Lithostratigraphische Neugliederung und Sedimentologie der Ablagerungen des Badenium(Miozän) um die Mittelsteirische Schwelle (Steirisches Becken, Österreich). *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* 133 (2), 223–257.
- Friebe J.G. (1991): Carbonate Sedimentation within a Siliciclastic Environment: The Leithakalk of the Weissenegg Formation (Middle Miocene; Styrian Basin, Austria). *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 1990 (Teil I), 1671–1687.
- Friebe J.G. (1993): Sequence stratigraphy in a mixed carbonate-siliclastic depositional system (Middle Miocene; Styrian Basin, Austria). *Geologische Rundschau* 82 (2).
- Gross M., Fritz I., Piller W.E., Soliman A., Harzhauser M., Hubmann B. et al. (2007): Das Neogen des Steirischen Beckens - Exkursionsführer. *Joanneum Geologie und Paläontologie* (9), 117–193.
- Iversen B. V., Moldrup, P., Schjonning, P., Jacobsen, O. H. (2003): Field Application of a Portable Air Permeameter to Characterize Spatial Variability in Air and Water Permeability. *Vadose Zone Journal* 2 (4), 618–626.
- Perroux K. M., White, I. (1988): Designs for Disc Permeameters¹. *Soil Science Society of America Journal* 52 (5), 1205.

- Plagge R., Renger M., Röth C. H. (1990): A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures. *Zeitschrift für Pflanzenernaehrung und Bodenkunde* 153 (1), 39–45.
- Reynolds W. D., Elrick, D. E. (1985): In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph Permeameter. *Soil Science* 140 (4), 292–302.
- Reynolds W. D., Elrick D. E. (1990): Poned Infiltration from a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow. *Soil Science Society of America Journal* 54, 1233–1241.
- Richards L., A. (1931): Capillary conduction through porous mediums. *Physics* 1, 318–333.
- Rodgers M., Mulqueen J. (2006): Field-saturated hydraulic conductivity of unsaturated soils from falling-head well tests. *Agricultural Water Management* 79 (2), 160–176.
- Rovey C. W., Cherkauer D. S. (1995): Scale Dependency of Hydraulic Conductivity Measurements. *Ground Water* 33 (5), 769–780.
- Sachsenhofer R. F., Lankreijer A., Cloetingh S., Ebner F. (1997): Subsidence analysis and quantitative basin modelling in the Styrian Basin (Pannonian Basin System, Austria). *Tectonophysics* 272 (2-4), 175–196.
- Schulze-Makuch D., Carlson D. A., Cherkauer D. S., Malik P. (1999): Scale Dependency of Hydraulic Conductivity in Heterogeneous Media. *Ground Water* 37 (6), 904–919.
- Schulze-Makuch D., Cherkauer D. S. (1995): Facies dependent scale behaviour of hydraulic conductivity and longitudinal dispersivity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 32 (7), 311.
- Schulze-Makuch D., Cherkauer D. S. (1997): Method developed for extrapolating scale behavior. *Eos Transactions American Geophysical Union* 78 (1), 3.
- Schulze-Makuch D., Cherkauer D. S. (1998): Variations in hydraulic conductivity with scale of measurement during aquifer tests in heterogeneous, porous carbonate rocks. *Hydrogeology Journal* 6 (2), 204–215.
- Vindum Engineering, Inc.: Tiny Perm II Portable Air Permeameter. User's Manual.
- Zhang R. (1997): Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61 (4), 1024.