

# **Maßstabsübergreifende hydraulische Untersuchungen an Sanden des Baden im oststeirischen Becken**

**Masterarbeit  
zur Erlangung des Titels  
Master of Science, MSc.  
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Karl-Franzens-Universität**

**Vorgelegt am  
Institut für Erdwissenschaften  
von  
Alexander Helfer  
Februar 2017**

**Betreuer: Winkler, Gerfried, Ass.-Prof. Mag. Dr.rer.nat.**



## **Danksagung**

Besonders möchte ich mich bei meinem Professor Dr. Gerfried Winkler für die Betreuung und Unterstützung während dieser Arbeit danken. Durch Ihre wissenschaftlichen Kompetenzen und die stets konstruktiven Anregungen, konnte ich das Beste aus dieser Arbeit machen.

Weiters bedanke ich mich bei meinen Studienkollegen für die gegenseitige Stütze während der letzten Jahre.

Meiner Familie möchte ich besonders danke, dass sie mich immer unterstützt hat und vor allem an mich geglaubt hat, diesen Weg zu schaffen zu können.

Ein Dankeschön natürlich auch an alle meine Freunde, welche in den letzten Jahren viele gute aber auch so manche schlechte Zeiten mit mir durchgestanden haben.

## Zusammenfassung

Die Schichten des Baden bilden im oststeirischen Becken wichtige Grundwasserleiter welche für die Wasserversorgung von Bedeutung sind. Die hydraulische Charakterisierung dieser Schichten trägt daher einen wichtigen Teil dazu bei, das hydraulischen System dieser Schichten zu verstehen. Zur Charakterisierung wurden dazu in einer Sandgrube nahe Pinkafeld, in dem die Schichten des Baden als homogener Sand aufgeschlossen liegen und von Störungen durchzogen werden, durch mehrere Messmethoden eine Charakterisierung durchgeführt.

Mittels Messungen durch Handpermeameter, Stechzylinderproben und Ringinfiltrometerversuchen konnte die hydraulische Durchlässigkeit ermittelt werden. Da sich die Messskalen dieser Methoden unterscheiden, konnte auch eine Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit von Millimeter bis Dezimeterbereich ermittelt werden.

Mit dem Handpermeameter wurden an 2 Flächen von jeweils  $4\text{m}^2$  die Permeabilität durch 1600 Messungen pro Fläche ermittelt. Anhand dieser Messungen konnte eine starke Variation der Durchlässigkeit festgestellt werden, obwohl es sich bei diesen Sanden um ein makroskopisch sehr homogenes Material handelt.

Durch diese nicht offensichtliche Heterogenität konnte auch bewiesen werden, dass die Entnahme der Proben mit Stechzylinder keine verlässliche Methode zu sein scheint.

Das Weitern konnte eine starke Richtungsabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit ermittelt werden. So ist die vertikale Durchlässigkeit am geringsten, und auch die horizontale Durchlässigkeit unterscheidet sich je nach Richtung.

Eine Skalenabhängigkeit konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Mehr kam es mit der Zunahme der Messskala zu einer leichten Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Auswertung der Störungen ergab für die Orientierung eine Übereinstimmung mit dem Störungslinament des oststeirischen Beckens. Für die hydraulische Durchlässigkeit wurde eine signifikant geringere Durchlässigkeit ermittelt als für das ungestörte Sediment.

## Abstract

The layers of Badenian in the eastern Styrian basin form important groundwater conductors which are significant for the water supply. The hydraulic characterization of these layers therefore plays a central part in understanding the hydraulic system of these layers. For classification, a hydraulic characterization was carried out by several measurement methods in a sand pit near Pinkafeld, in which the layers of Badenian are located as homogeneous sand and interspersed with faults.

The hydraulic permeability could be determined by means of measurements by a hand-held air parameter, cylinder samples and ring Infiltrometer tests. Since the measuring scales differ from these methods, a scale dependence of the hydraulic permeability from millimetre to decimetre range could also be determined.

With the hand-held air permeameter, the permeability was determined by means of two measurements of 1600 measurements per area on 2 surfaces of 4 m<sup>2</sup> each. Based on these measurements, a strong variation of the permeability was found, although these sands are a macroscopically very homogeneous material.

This non-obvious heterogeneity has also proved that the removal of the samples with a cylinder does not appear to be a reliable method.

Further, a strong directional dependence of the hydraulic permeability could be determined. Thus, the vertical permeability is the least, and the horizontal permeability differs according to the direction.

A dependency on scale could not be determined unequivocally. The increase in the measuring scale led to a slight decrease in hydraulic permeability.

The evaluation of the faults revealed a correlation with the fault lines of the East Styrian basin. A significantly lower permeability was determined for the hydraulic permeability than for the undisturbed sediment.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

1. Einleitung.....	1
2. Die hydraulische Durchlässigkeit.....	3
3. Die Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit .....	5
4. Das oststeirische Becken .....	13
4.1. Tektonik und Subsidenz.....	14
4.2. Sedimentationsgeschichte .....	15
4.1.1. Ottangium.....	15
4.1.2. Karpatium.....	16
4.1.3. Badenium .....	16
4.1.4. Sarmatium.....	18
4.1.5. Pannonium .....	19
5. Das Projektgebiet.....	21
5.1. Geologische Gegebenheiten im Projektgebiet .....	21
5.2. Messungen und Probennahme .....	22
5.2.1. Südwest – Nordost Wand.....	23
5.2.2. Ost-Südost – West-Nordwest Wand .....	23
5.2.3. Messung der vertikalen Durchlässigkeit.....	24
6. Methoden .....	26
6.1. Tragbarer Luftpermeameter (Tiny Perm II).....	26
6.2. Stechzylinder und Constant Head Permeameter .....	28
6.2.1. Ermittlung der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit .....	28
6.2.2. Ermittlung bodenphysikalischer Parameter .....	29
6.3. Ringinfiltrrometer .....	30

6.3.1.	Vorgehensweise Einzelringinfiltrrometer .....	30
6.3.2.	Auswertung der Ergebnisse .....	31
6.4.	Statistische Auswertung .....	33
6.4.1.	Kringing .....	33
6.4.2.	Häufigkeitsverteilung und Quantil-Quantil Pot.....	35
6.4.3.	Statistische Tests auf Normalverteilung .....	36
7.	Resultate .....	37
7.1.	Horizontale Durchlässigkeit SW-NO Wand .....	37
7.1.1.	Ergebnisse Tiny Perm Messungen .....	38
7.1.2.	Ergebnisse Stechzylinder .....	39
7.1.3.	Bodenphysikalische Parameter .....	41
7.2.	Horizontale Durchlässigkeit OSO-WNW Wand .....	42
7.2.1.	Ergebnisse Tiny Perm Messungen .....	43
7.2.2.	Ergebnisse Stechzylinder .....	44
7.2.3.	Bodenphysikalische Parameter .....	45
7.3.	Vertikale Durchlässigkeit .....	46
7.3.1.	Ergebnisse Tiny Perm .....	47
7.3.2.	Ergebnisse Stechzylinder .....	49
7.3.3.	Ergebnisse Infiltrometerversuche .....	51
7.3.4.	Bodenphysikalische Parameter .....	52
8.	Diskussion .....	54
8.1.	Methodenvergleich .....	54
8.2.	Richtungsabhängigkeit der hydr. Durchlässigkeit.....	55
8.3.	Hydraulische Charakterisierung der Störungen .....	57
8.3.1.	Orientierung der Störungen.....	58
8.3.2.	Hydraulische Durchlässigkeit der Störungen.....	59
8.3.3.	Bodenphysikalische Parameter der Störungen .....	62
8.4.	Interaktion zwischen Porosität, Trockendichte und hydr. Durchlässigkeit	64

8.5.	Die Skalenabhängigkeit.....	65
8.6.	Die Heterogenität der hydraulischen Durchlässigkeit (Kriging) .....	67
8.6.1.	SW-NO Wand .....	67
8.6.2.	OSO-WNW Wand .....	69
9.	Interpretation und Ausblick.....	71
9.1.	Zur hydraulischen Charakterisierung.....	71
9.2.	Zum Methodenvergleich.....	72
9.3.	Zur Heterogenität .....	73
9.4.	Zur Skalenabhängigkeit.....	74
	Abbildungsverzeichnis.....	76
	Literaturverzeichnis.....	78
	Anhang A.....	83
	Anhang B.....	87
	Anhang C.....	88

# 1. Einleitung

Im nördlichen oststeirischen Becken treten die Tiefengrundwässer besonders in den Schichten des Baden und Sarmat auf und spielen daher eine große Rolle in der Wasserversorgung dieser Region. Durch das Ausstreichen dieser Sedimente im Norden gelten diese Schichten nicht nur als wichtiger Wasserlieferant, sondern haben durch ihre hohe Durchlässigkeit und das Einfallen der Schichten nach Süden 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 regional 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 oberflächlichen 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 und Elrick 1985; Perroux und White 1988; Plagge et al. 1990; Rodgers und 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 welche auf ihre 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 konnten 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 und Cherkauer 1995, 1997). Die Skalenabhängigkeit dieser Parameter kann auch mit einem ähnlichen Potenzgesetz beschrieben werden. Allerdings wären weitere Untersuchungen dieser Einflussgrößen in Zusammenhang mit der Messskala notwendig um ihre Skalenabhängigkeit bestätigen und auch begründen zu können. Rovey und Cherkauer (1995) zeigen in deren Arbeit, dass es auch ein direkter Zusammenhang zwischen dem Anstieg der hydr. Leitfähigkeit und der Varianz besteht.

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

## 2. Die hydraulische Durchlässigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit, gekennzeichnet als  $K$  oder  $K$ -Wert, ist eine der wichtigsten bodenhydrologischen - hydraulischen Kenngrößen (Parameter) und gleichzeitig ein wichtiger Faktor für den Wassertransport im Boden. Die hydraulische Durchlässigkeit wird in allen Gleichungen für den Grundwasserfluss verwendet sowie auch für die Simulation von Infiltrationsprozessen (Stibinger 2014).

Der Parameter der gesättigten Leitfähigkeit  $K_s$  wird definiert in welcher Zeit ein Boden Wasser bei gegebenen Druckgefällen transportieren, sprich versickern oder infiltrieren kann. Das heißt, die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit entspricht der Menge an Wasser welche in einer bestimmten Zeit bei einem hydraulischen Gradienten von 1 durch den Einheitsquerschnitt geleitet wird. Die Einheit der Durchlässigkeit wird als  $l/t$  angegeben. Sie ist der wichtigste Bestandteil der Darcy Gleichung. Bei den gesättigten Strömungsverhältnissen ist die Geschwindigkeit der Wasserströmung ( $v$ ) in den Böden oder porösen Medien direkt proportional zum hydraulischen Gradienten ( $i$ ). Der Koeffizient dieser direkten Proportionalität ist eine Konstante mit Geschwindigkeitseinheiten und wird gekennzeichnet mit dem Symbol  $K_f$  der hydraulischen Leitfähigkeit. Folgende Gleichung beschreibt die Erklärung:

$$v = K \cdot i \quad (2.1)$$

Bei gesättigten Strömungsverhältnissen und dem Gesetz nach Darcy, folgendermaßen:

$$v = K \cdot \frac{\delta h}{\delta x} \quad (1.2)$$

Wobei  $x$  der Abstand in Richtung der Grundwasserströmung ist und  $h$  die hydraulische Druckhöhe (Stibinger 2014). Das Gesetz nach Darcy ist abhängig von folgenden Faktoren (Spektrum Akademischer Verlag 2000):

- Wassergehalt des Mediums
- Querschnitt der Fließrichtung
- Verbindung und Tortuosität der wassergefüllten Poren
- Bodengefüge

Gesteine oder Böden mit kleinen Poren erlauben nur einen langsamen Transport von Wasser, während Materialien mit größeren, weniger verengten Poren einen schnelleren Transport ermöglichen. Wasser, das durch kleine Poren fließt, muss sich mehr bewegen um eine bestimmte Strecke zurückzulegen als Wasser, das durch größere Poren fließt (Fitts 2013). Die Variation der hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrundes ist eine Funktion der intrinsischen Permeabilität, des Sättigungsgrades, der Viskosität des durch den Untergrund verlaufenden Fluids, der Struktur und der Lithologie der geologischen Formation (Salako und Adepelumi 2016). Anisotropie spielt eine sehr wichtige Rolle in der Bodenhydrologie.  $K$ -Werte in vertikaler Richtung sind gekennzeichnet als  $K_v$ , hydraulische Leitfähigkeit in horizontaler Richtung als  $K_h$  und  $K$ -Werte in Zwischenrichtungen als  $K_r$ . Der Wert von  $K_r$  kann durch folgende Formel angenähert werden:

$$K_r = \sqrt{K_v \cdot K_h} \quad (2.2)$$

oder durch

$$\ln K_r = \frac{\ln K_v + \ln K_h}{2} \quad (2.3)$$

Die Bodeneigenschaften unterscheiden sich mit der Distanz in alle Raumrichtungen sodass eine Homogenität so gut wie kaum vorhanden ist.

Zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit gibt es eine Vielzahl an Tests, die sich durch In-Situ Tests im Feld und Messungen im Labor, unterscheiden. Je nach geologischen Bedingungen und vorhandenen Utensilien werden unterschiedliche Methoden präferiert (Stibinger 2014).

### **3. Die Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit**

In vielen wissenschaftlichen Arbeiten konnte nachgewiesen werden, dass es zwischen der Messskala und der hydraulischen Durchlässigkeit einen direkten Zusammenhang gibt. In den meisten Fällen kann die Skalenabhängigkeit auf Heterogenitäten im untersuchten Untergrund zurückgeführt werden. Die scheinbare gemessene hydraulische Leitfähigkeit hängt oft von der Skala der Messung ab. Somit kann sich der, auf einen Kubikdezimeter gemessene Mittelwert der hydraulischen Durchlässigkeit, von dem auf einem Kubikmeter gemessene Mittelwert stark unterscheiden. Sehr oft wird dieser Effekt ignoriert und K-Werte werden ohne Angabe des Maßstabs der Messung angeführt (Ghanbarian et al. 2015).

(Lai und Ren 2007) führten an Böden aus sandigem Silt in China Infiltrationsversuche durch um die Auswirkungen der Messgröße auf die hydraulische Leitfähigkeit zu bewerten. Ein weiteres Ziel war es, den kleinsten Doppelringdurchmesser zu finden, der zur Abdeckung eines repräsentativen Bereichs für zuverlässige Leitfähigkeitsmessungen benötigt wird. Die Versuche wurden an 7 ausgewählten Stellen mit den unterschiedlichen Ringgrößen 20, 40, 80 und 120cm Durchmesser für den Innenring durchgeführt. Sie kamen zum Ergebnis, dass es bei Ringdurchmessern unter 80cm sowohl zu einem Anstieg, als auch Sinken des K-Wertes kommen kann (Abb. 1). Als Schlussfolgerung liefern die Ergebnisse, dass sich mit der Ringgröße auch die Repräsentativität eines Bereiches erhöht und die hydraulische Leitfähigkeit in Bezug auf die Heterogenität des Bodens stabiler wird. Wuest (2005) führte ähnliche Versuche durch, benutzte aber Ringdurchmesser von 20, 30 und 45cm und stellte einen Anstieg der Infiltrationsrate mit größer werdenden Durchmessern um 94% fest. Er wollte in seinen Versuchen nicht nur den Skaleneffekt, sondern auch die Auswirkungen der Eindringtiefe des Ringes in den Boden und den Unterschied zwischen Einzel- und Doppelring Infiltrationsversuchen veranschaulichen.

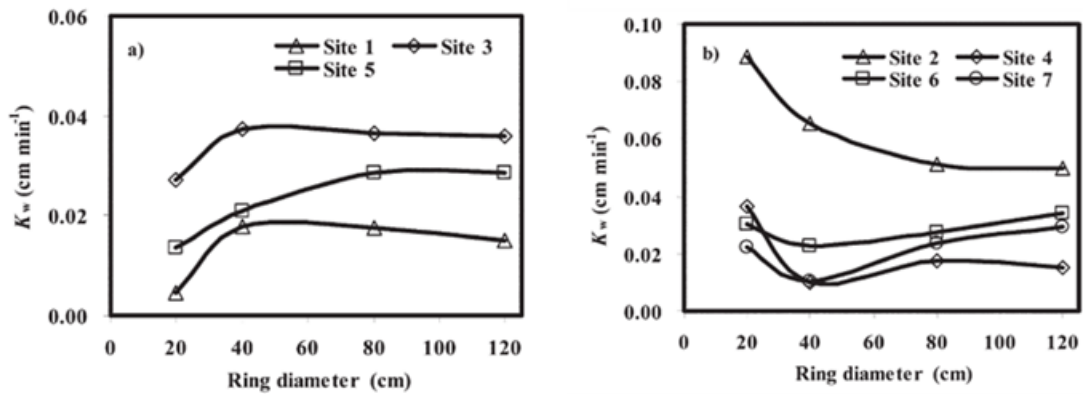


Abb. 1: Variation der gesättigten Leitfähigkeit verschiedenen Ringdurchmessern (Lai und Ren 2007)

Frühere Studien haben gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit eines Aquifers anzusteigen scheint, wenn der Anteil des getesteten Aquifers, welcher in die Messung miteinbezogen wird zunimmt. Bisher haben sich solche Untersuchungen auf verschiedene Verfahren zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit auf den Interessenmaßstab gestützt. Dies führt zur Überlegung, dass der beobachtete Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeit auf das Messverfahren zurückzuführen ist und nicht auf die Messskala. Besonders wichtige Beiträge zum Thema der Skalenabhängigkeit wird von Schulze-Makuch in den Arbeiten (Schulze-Makuch und Cherkauer 1995, 1997, 1998; Schulze-Makuch et al. 1999), in denen er die Skalenabhängigkeit an zahlreichen Beispielen untersucht, erbracht. Anhand der Ergebnisse stellten sie einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Messskala und hydraulischer Durchlässigkeit fest. Dieser Zusammenhang kann mit einem Potenzgesetz beschrieben werden welches sie „Skale Law“ nennen.

$$K = c(V, S)^{\frac{b}{D}} \quad (3.1)$$

Mit K als hydraulische Durchlässigkeit [LT-1], c ein Parameter der mit den Heterogenitäten innerhalb eines geologischen Mediums zusammenhängt (Hydr. Durchlässigkeit bei 1m<sup>3</sup>, 1m<sup>2</sup> oder 1m), V [m<sup>3</sup>], S [m<sup>2</sup>, m] ist das getestete Probenvolumen, b ein vom Fluidströmungstyp abhängiger Wert (dimensionslos) und D die effektive Dimension des Maßstabs. Für b/D=m wird bei reinem Porendurchfluss ein Wert von 0.5 angenommen, für Karst ein Wert von 1, Kluftaquifere oder

Doppelporositäten haben je nach Dominanz der Durchflussart einen Wert zwischen 0.5 und 1 (Schulze-Makuch et al. 1999). Somit ist die Beziehung zwischen hydraulischer Durchlässigkeit und Messgröße eine Funktion des Durchflusstyps und Grad der Heterogenität im Medium. Auch Untersuchungen an homogenen Medien wurden durchgeführt, allerdings konnte hier keine Skalenabhängigkeit festgestellt werden. Sie untersuchten in ihren Arbeiten die Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit von heterogenen Medien. Dabei analysierten sie unzählige Daten aus Aquiferen von der Labor- bis zur regionalen Skala um einen Zusammenhang zwischen hydraulischer Leitfähigkeit und Skalengröße festzustellen. Die Daten stammten aus verschiedenen geologischen Einheiten mit konsolidierten wie auch nicht konsolidierten Material. Die Daten wurden nach geologischem Ursprung, Aquifertyp (Poren-, Kluft- oder Karstaquifer) und nach Messskala separiert. Die so erhaltenen Ergebnisse wurden gegen das Probenvolumen aufgetragen um den Zusammenhang zwischen hydraulischer Durchlässigkeit und Probenvolumen darzustellen (Abb. 2). (Schulze-Makuch et al. 1999) stellten fest, dass es zwischen Probenvolumen und Durchlässigkeit einen empirischen Zusammenhang gibt der mit der Formel (3.1) beschrieben werden kann und nannten diese „Scale Law“. Die Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Messskala erfolgt bis zu dem Punkt („upper bound of relationship“), ab dem sich das Medium homogen verhält und K mit der Skala konstant bleibt und dem Repräsentativen Elementarvolumen entspricht.

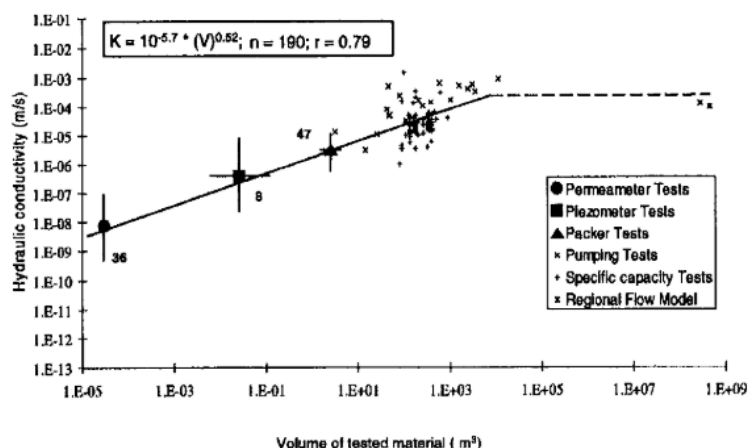


Abb. 2: Beispiel für den Zusammenhang zwischen hydraulischer Durchlässigkeit und Messskala aus einem Karstaquifer.

Punkt an dem die Kurve abflacht entspricht der „upper bound of relationship“. Ab hier verändert sich K nicht mehr und das Probenvolumen entspricht dem REV (Schulze-Makuch et al. 1999).

In Schulze-Makuch et al. (1999) wurde der Fokus nicht nur auf heterogene Medien gelegt, es wurde auch der Skaleneffekt in homogenen Medien untersucht. Dabei wurden die Ergebnisse eines Sandsteines herangezogen der über ein großes Gebiet als relativ homogen erschien. Das Resultat dieser Untersuchung ergab, dass in einem rein homogenen Medium kein Skaleneffekt auftritt (Abb. 3). Da aber in der Natur keine absolute Homogenität vorkommt, kann eine geringe Skalenabhängigkeit höchstens auf Laborskala festgestellt werden. Allerdings ist diese wiederum auf eine sehr kleinräumige Heterogenität zurückzuführen.

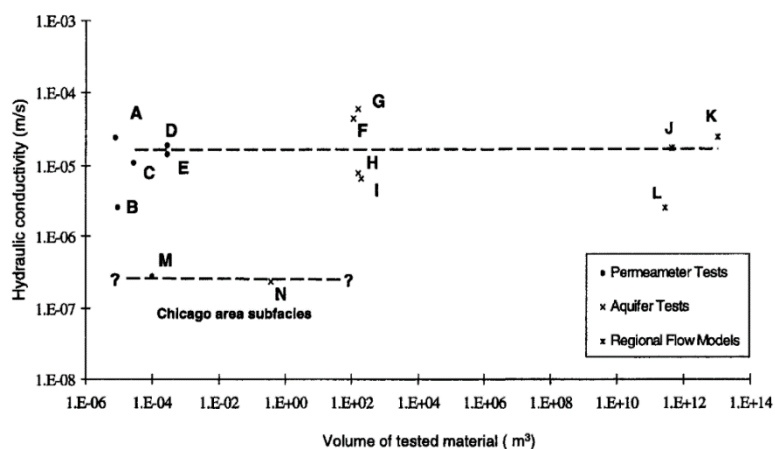


Abb. 3: Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit in einem homogenen Sandstein mit zunehmender Skala

(Fallico et al. 2010) führten in Anlehnung an die Arbeit von (Schulze-Makusch et al. 1999) Versuche zur Skalenabhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit an einem künstlichen, im Labor hergestellten Aquifer aus Sand mit einer bekannten Korngrößenverteilung durch. Aus ihren Ergebnissen versuchten sie, schon wie (Schulze-Makusch et al. 1999), ein Potenzgesetz für die Skalenabhängigkeit abzuleiten. Außerdem konnten sie durch Untersuchungen der Porosität einen neuen empirischen Zusammenhang zwischen Porosität und Scaling herleiten.

Für ihren Versuch bauten sie einen 10x7x3m großen künstlichen ungespannten Aquifer mit eingebautem Pumpbrunnen und 17 Piezometer. An diesem Modell führten sie Slug-Tests und Pumpversuche durch um die hydraulische Durchlässigkeit zu ermitteln. Zusätzlich wurden Stechzylinder verschiedener Durchmesser (6,4; 10; 12cm) entnommen um an diesen die Durchlässigkeit zu bestimmen. Die Auswertung der gesättigten Leitfähigkeit in Zusammenhang mit der Probenskala (Abb. 4)

bestätigte, das von (Schulze-Makusch et al. 1999) abgeleitete Skalengesetz (3.1). Fallico et al. (2010) erhielten als Ergebnis

$$K = 0,0000445 \cdot R^{0,083} \quad (3.2)$$

Obwohl Schulze-Makuch et al. (1999) für den Exponenten  $m$  einen Wert zwischen 0.5 und 1 angeben, stimmt dieser mit dem kleinen Exponenten  $m$  des Modellversuchs überein. Schulze-Makuch untersuchte den Zusammenhang in einer natürlichen Umgebung. Der Maßstab des künstlichen Aquifers ist um vieles kleiner als der eines Natürlichen. Daraus ergibt sich der geringe Wert des Exponenten  $m$ . Das Ergebnis für die Variable  $c$  stimmt jedoch mit dem von Schulze-Makuch überein, die in ihrer Arbeit einen Wertebereich für  $\log Ks$  von -4 bis -10 angeben.

Untersucht wurde auch der Zusammenhang zwischen Porosität und Skala sowie  $Ks$  im Zusammenhang mit der Porosität. Das Resultat dieser Untersuchung ist, dass auch die Porosität mit zunehmender Skala zunimmt (Abb. 4, Abb. 5). Auch hier folgt die Abhängigkeit einem Potenzgesetz:

$$\phi = 0,519 \cdot R^{0,073} \quad (3.3)$$

$R$ .....Messskala  
 $\phi$ .....Porosität

Allerdings ist es nicht möglich, aufgrund der Anzahl der Untersuchungen zu diesem Thema, allgemein gültige Schlussfolgerungen zu ziehen. Das hier abgeleitete Verhalten von Porosität zur Skala kann in anderen Kontexten oder zu realen Aquiferen in verschiedenen Maßstäben nicht vergleichbar sein. Die Gründe, die in dieser Arbeit die Porositätsskalierung bestimmen, können nicht nachgewiesen werden, sondern darüber können nur Hypothesen aufgestellt werden. Daher ist eine Weiterentwicklung dieser Themen sowohl mit theoretischen als auch mit experimentellen Untersuchungen wünschenswert, um eine befriedigende Erkenntnis des Phänomens zu erzielen.

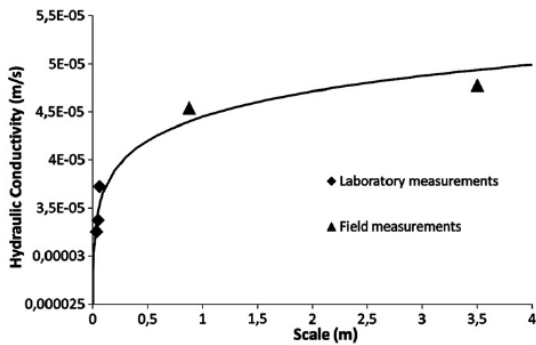


Abb. 4 Verlauf der hydraulischen Durchlässigkeit mit steigender Skala (Fallico et al. 2010)

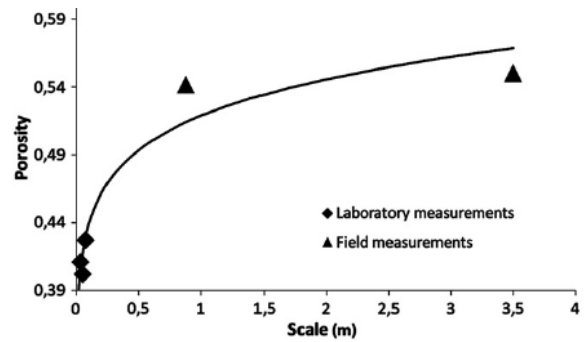


Abb. 5: Verlauf der Porosität mit ansteigender Skala (Fallico et al. 2010)

An einem gespannten heterogenen Aquifer führten (Fallico et al. 2012) Tests durch um festzustellen ob auch der Speicherkoeffizient eines Aquifers einer Skalenabhängigkeit zusammen mit der hydraulischen Durchlässigkeit unterliegt. Dazu wurden Proben aus dem Aquifer mittels Constant-Head-Permeameter im Labor sowie Slug-Tests und Pumpversuche durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Speicherkoeffizient demselben Skalengesetz (3.1) folgt wie die hydraulische Durchlässigkeit (Abb. 6).

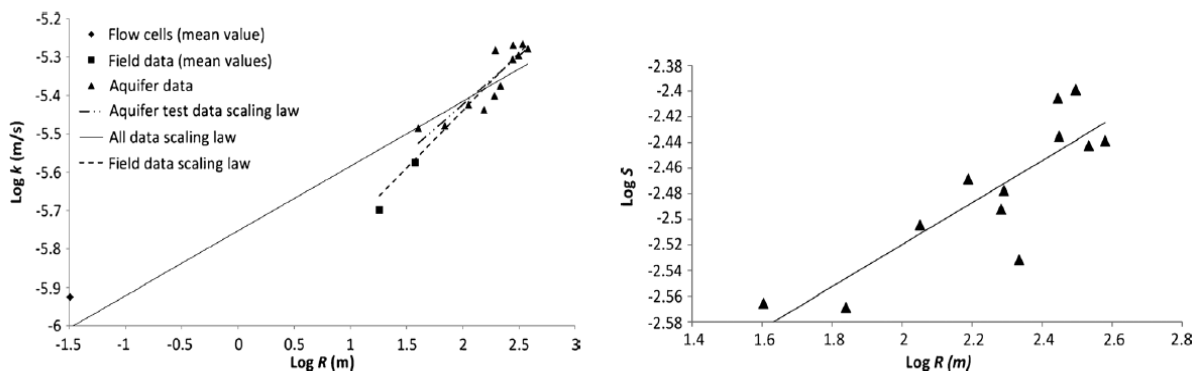


Abb. 6: Links: Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit mit den jeweiligen Scale Laws. Rechts: Die Skalenabhängigkeit des Speicherkoeffizienten (Fallico et al. 2012).

(Guimerà et al. 1995) versuchten die Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit in einem Kluftaquifer aus granitischem Gestein in Zentralspanien (El Berrocal) zu untersuchen. Um die verschiedenen Skalenbereiche abzudecken führten sie Bohrlochtests und Pumpversuche durch sowie ein numerisches Modell des

gesamten Einzugsgebiets. Für den kleinskaligen Bereich (dm Skala) wurden Pulse, Slug und Constant Head Injection Tests ausgeführt. Für den mittleren Skalenbereich (m Skala) wurden Recoverytests durchgeführt und Crossholetests für den 10er Meter Bereich. Um die regionale Skala darzustellen wurde ein numerisches Modell erstellt. Abb. 7 stellt die Ergebnisse der Skalenabhängigkeit grafisch dar. Es besteht ein deutlicher Trend zur Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit mit steigender Skala. Ausnahmen treten bei den Single-Hole tests und Cross-Hole Tests auf. Hier zeigen die Messwerte der Single-Hole Test eine höhere Durchlässigkeit als Cross-Hole Tests, obwohl die Skala kleiner ist. Guimerà et al. (1995) begründen diesen scheinbaren Widerspruch damit, dass diese Abweichung durch die Planung und Durchführung der Cross-Hole Tests bestimmt wird. Die Pumpintervalle für Cross-Hole Tests werden so gewählt, dass die Pumpraten möglichst groß sind. Wenn die Pumpintervalle zufällig gewählt würden, sind die Chancen größer, dass die Pumpraten kleiner sind. Die gemessene hydraulische Leitfähigkeit nimmt mit der Messskala zu. Jedoch sind die Faktoren, die die Korrelation verursachen, noch nicht klar. Grundsätzlich könnten mehrere Faktoren neben der Skalenabhängigkeit dazu führen, dass die beobachteten Zusammenhänge, durch Begrenzung der Testmethoden, den Skineffekt und den Bohrlochspeichereffekt herbeigeführt werden.

Skalierungseffekte variieren konsequent mit der Art des geologischen Mediums und dem Grad der sekundären Porosität. Primäre Porosität allein, hat im Allgemeinen den kleinsten Bereich in dem sich die Skala erhöht. Die Zunahme des Skaleneffekts ist bei konsolidierten, zerklüfteten Medien viel höher. Bei Karst-Grundwasserleitern erhöht sich die hydraulische Leitfähigkeit ohne offensichtliche Obergrenze, so dass es nicht einmal möglich ist, von einer einheitlichen regionalen hydraulischen Leitfähigkeit zu sprechen. Die Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit mit dem Einflussradius des Testverfahrens steht im Zusammenhang mit einem Anstieg der Varianz von  $\log(k)$  bei größeren Abständen die Messpunkte betreffend. Die Korrelation deutet darauf hin, dass eine Zunahme in der hydraulischen Leitfähigkeit durch eine gemeinsame Abhängigkeit von der Varianz bestimmt wird (Abb. 7, Abb. 8). Die Varianz der Messergebnisse steigt so wie die hydr. Durchlässigkeit mit der Messskala an und wird bei derselben Reichweite (Range) wie die Leitfähigkeit konstant (Rovey und Cherkauer 1995).

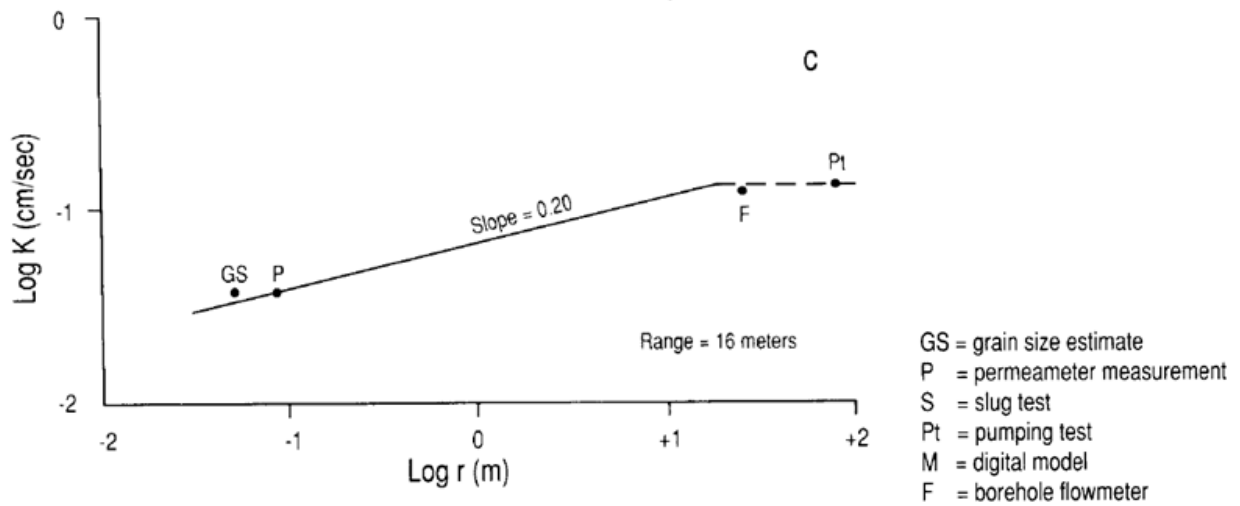


Abb. 7: Anstieg der hydr. Durchlässigkeit mit ansteigender Messskala (Rovey und Cherkauer 1995)

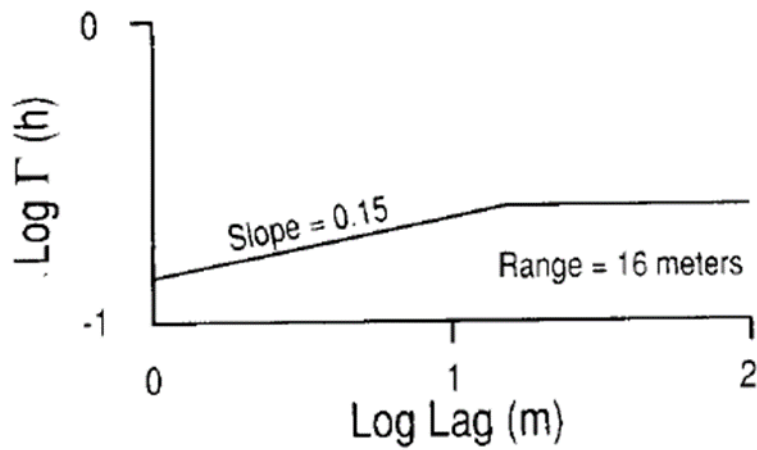


Abb. 8: Semivariogramm zu den Messergebnissen aus Abb. 7 (Rovey und Cherkauer 1995)

## 4. Das oststeirische Becken

Das steirische Becken befindet sich am östlichen Rande des Ostalpin und bildet mit einer Länge von etwa 100km und einer Breite von 50km die Fortsetzung des westpannonischen Beckens. Das Becken wird durch die Mittelsteirische Schwelle in das seichtere weststeirische Becken und das etwa 4km tiefe Oststeirische Becken geteilt und von der Südburgenländischen Schwelle vom Westpannonischen Becken getrennt (Abb. 9). Gegliedert wird das Becken in das Weststeirische Becken, Murecker Becken, Gnaser Becken und das Fürstenfelder Becken (Sachsenhofer et al. 1997).

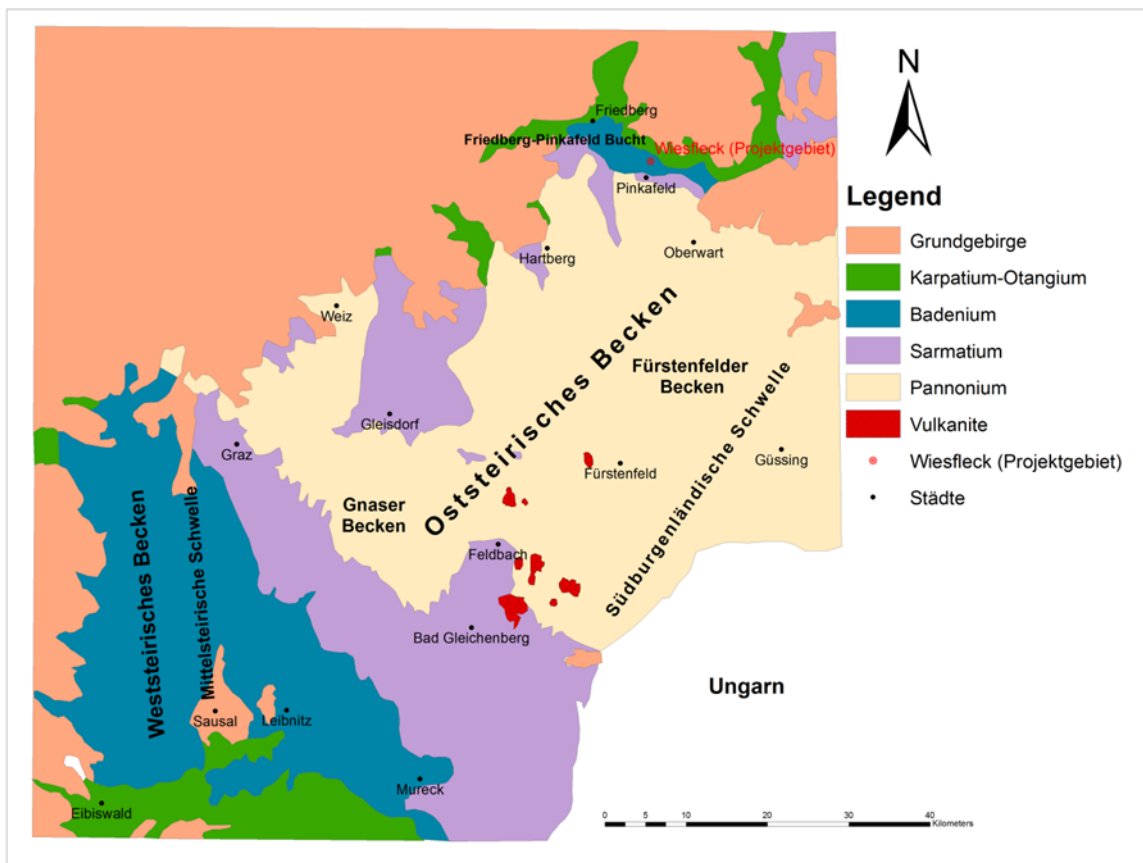


Abb. 9: Geologische Karte des Steirischen Beckens (vereinfacht nach (Gross et al. 2007))

## 4.1. Tektonik und Subsidenz

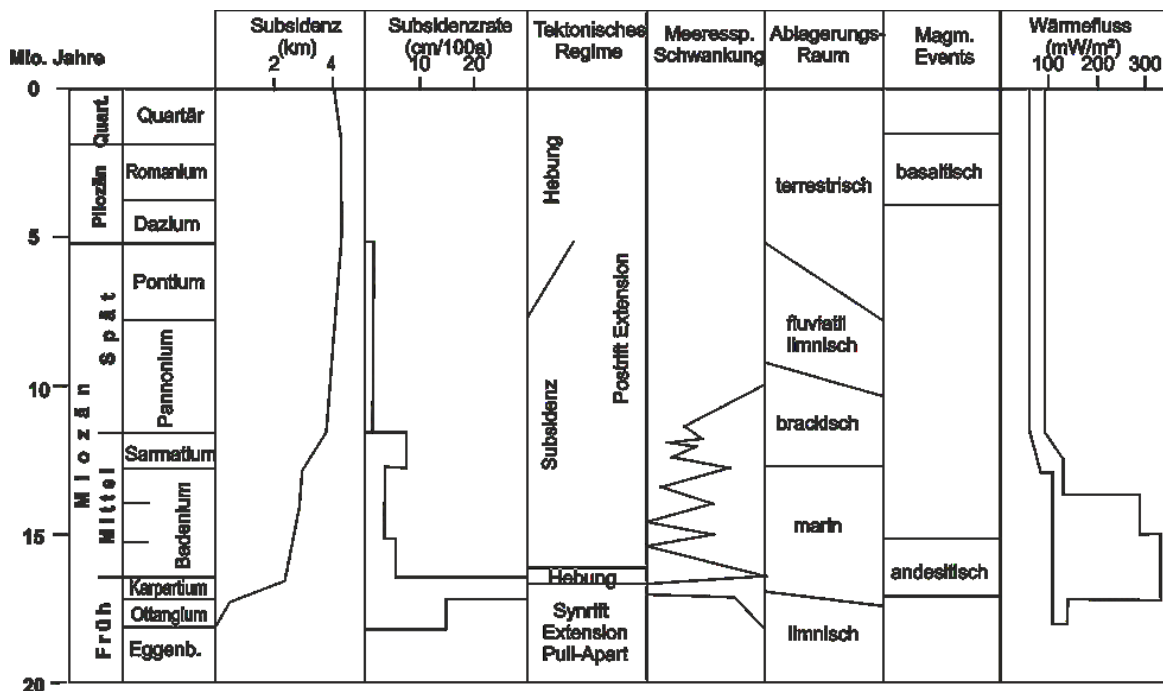


Abb. 10: Die Entwicklung des Steirischen Beckens (Domberger et al. 2005; Sachsenhofer et al. 1996)

Durch die Kompression der Ostalpen kam es am Ende der alpidischen Orogenese zu einer lateralen Verdrängung von Krustenteilen in Richtung Südosten. Die Bewegungen fanden entlang einer sinistralen (SEMP im Norden) und einer dextralen Seitenverschiebung (PAL im Süden) statt. Durch die Nord Bewegung der pannonischen Platten und dem relativen Stillstand des alpinen Orogen entstand ein Becken aufgrund eines Pull-Apart Mechanismus (Sachsenhofer et al. 1997).

Der prätertiäre Untergrund wird aufgrund von gravimetrischen Daten auf -3200 bis -3700m im Fürstenfelderbecken und auf -4100m in Gnaser Becken geschätzt. Die Subsidenz der einzelnen Teilbecken begann im Ottangium mit einer Absenkungsrate von 15cm/100a. Im Karpatium erreicht die Subsidenzrate mit 30cm/100a ihren Höhepunkt. Im mittleren Karpatium wurde der erste Meeresspiegelhöchststand erreicht welchem am Ende des Karpatium wieder eine Regression folgte. Mit der starken Absenkung Zeit entwickelte sich gleichzeitig ein andesitischer Vulkanismus im Südosten des Beckens. Am Ende des Karpatium kam es durch tektonische Bewegungen zur Verkippung von Krustenblöcken und zur Hebung des westlichen Hinterlandes wodurch sich die Mittelsteirische Schwelle heraushob. Diese tektonischen Bewegungen führten am Übergang Karpatium/Badenium zu einer

Diskordanz der darüber liegenden Sedimente des unteren Badenium (Ebner und Sachsenhofer 1991).

Im unteren Badenium nahm die Subsidenzrate wieder ab bis sie im mittleren Badenium einen geringen Wert von 2cm/100a erreichte. Trotz der geringen Subsidenzrate herrschten im unteren Badenium aufgrund einer Transgression vollmarine Sedimentationsverhältnisse. Der Vulkanismus verschob sich in dieser Zeit weiter nach Norden. Im Sarmatium erhöhte sich die Absenkungsrate wieder auf 7,5cm/100a. Durch die stärkere Absenkung des Pannonischen Beckens kippte das Steirische Becken leicht Richtung Norden wodurch es zu einer Abgrenzung zum Westpannonischen Becken kam und die Salinität im Steirischen Becken zu sinken begann. Im Pannonium sank die Subsidenzrate wieder und betrug <1,5cm/100a. Im Laufe des Pannoniums wechselte die Sedimentation durch die Trennung der beiden Becken von Salinen Verhältnissen zu Süßwasser Verhältnissen.

Ab dem Pliozän begannen eine Hebung und eine daraus folgende Erosion der abgelagerten Sedimente um mehrere 100m. Ab dem Pliozän setzte erneut eine Phase vulkanischer Aktivität ein (Ebner und Sachsenhofer 1991).

## **4.2. Sedimentationsgeschichte**

### **4.1.1. Ottangium**

Nach einer langen Zeit der Erosion unter Bildung von roten Paläoböden beginnt im Ottangium die Subsidenz und damit auch die Sedimentation im oststeirischen Becken. Dabei kam es im zentralen Beckenraum zur Ablagerung limnischer Sedimente aus bituminösen und kohleführenden Mergeln (Ebner und Sachsenhofer 1995). Im Hangenden der an der Basis liegenden Roterdevorkommen liegen feinklastische Schichten des Radlgebirges und die bereits erwähnten limnischen Sedimente. Darüber lagerten sich am südwestlichen Beckenrand der Radl-Wildbachschutt sowie im Beckenzentrum Schichten aus Konglomerat ab. Diese Schichten werden von den feinklastischen zyklischen Eibiswalderschichten überlagert, welche fluviatile, limnisch-fluviatile und limnische Phasen zeigen (Ebner und Sachsenhofer 1991). Aufgeschlossen liegen die limnisch-fluviatilen Sedimente des Ottangium im

Südwesten in der Eibiswalder Bucht mit dem Radlgebirge und im Norden der Friedberg-Pinkafeld Bucht vor (Kollmann 1964).

#### 4.1.2. Karpatium

Geprägt war das Karpatium von einer intensiven Extensionstektonik wodurch es zur Entstehung eines N-S verlaufenden Sedimentationsgraben kam. Gleichzeitig entstand durch die starke Extensionstektonik ein saurer bis intermediärer Vulkanismus im Süden des Beckens im Raum Feldbach. Am Ende des Karpatium kam es zu einer Zunahme der tektonischen Aktivitäten wodurch es zu einer Hebung des Grundgebirges sowie einer Regression kam (Domberger et al. 2005). Diese tektonischen Bewegungen verursachten das Kippen der Krustenblöcke und die Hebung des westlichen Hinterlandes sowie das Herausheben des Sausalgebirges. Seit dieser Zeit bildet die mittelsteirische Schwelle eine strukturelle Trennung des weststeirischen Beckens vom oststeirischen Becken (Ebner und Sachsenhofer 1995). Als Beckenfazies des Karpatischen Meeres wurden im südlichen und zentralen oststeirischen Becken mehrere hundert Meter dicke kalkhaltige Schlammsteine und Schluffsteine (Steirischer Schlier) abgelagert. Die Hebung bedingte die Bildung von Schwemmfächern durch einsetzende Erosion am Beckenrand. Dort lagerten sich Konglomerate in einer tonig-mergelige Matrix ab, welche sich weit in Richtung Beckenzentrum ziehen. In der Friedberg-Pinkafelder Bucht kam es zur Ablagerung limnisch-fluviatiler Sedimente. Im Hangenden dieser Sedimente befindet sich die Sinnersbergerger Formation, welche einen Schuttsaum in einer tonig-sandigen Matrix entlang des Grundgebirges bildet. Darüber wechseln sich Blockschutt-, Sand- und Schotterlagen mit einer Mächtigkeit von 200-600m ab (Ebner und Sachsenhofer 1991).

#### 4.1.3. Badenium

An der Grenze Karpatium-Badenuim 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 und

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 und Sachsenhofer 1995) (Abb. 11). Während des Badenium begann der Vulkanismus welcher im Karpatium im Süden des Beckens begann immer weiter nach Norden zu wandern (Ebner und 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).

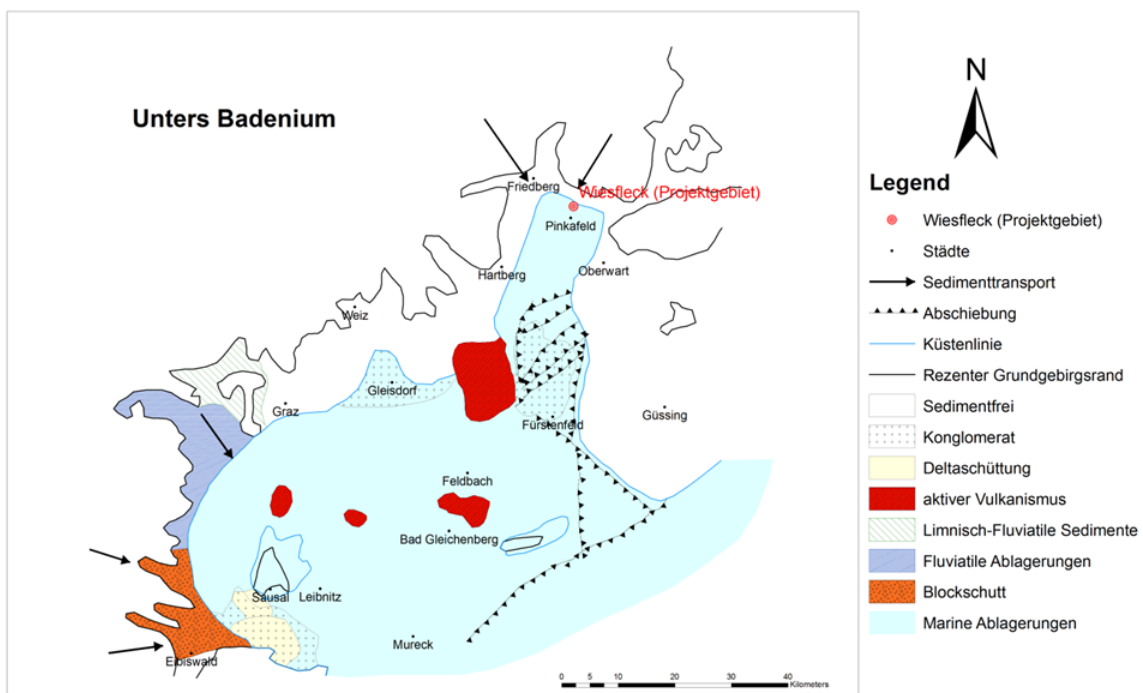


Abb. 11: Paläogeographie im unteren Badenium (nach Ebner und Sachsenhofer 1995)  
Ausbreitung der marinen Sedimentation bis weit in die Friedberg –Pinkafeld Bucht

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 Badenium führte eine Meeresspiegel-Tiefstand zu Erosionslücken im östlichen Teil des Beckens und zu einer Progradation von Delta und fluviatilen Sedimenten im nordwestlichen Beckenbereich (Friebe 1990).

#### 4.1.4. Sarmatium

Am Beginn des Sarmatium kam es nach einer Regressionsphase im Oberbadenium zu einer erneuten Transgression wodurch es zu einer Überflutung der beckeninternen Schwellen und der bereits erloschenen Vulkane kam. Eine einheitlich marine Sedimentation drang in Richtung Norden und Westen über weite terrestrische Bereiche vor. Zur selben Zeit kam es zur Abschnürung der Parathetys und zum Aussüßen des so entstandenen Binnenmeeres. Marines Untersarmat liegt in Form von fossilreichen Tonen und Tonmergel mit Einschaltungen von Kalklagen als Waldhofschichten östlich und nördlich von Graz vor. Östlich von Weiz tritt das Untersarmat wieder als Rollsdorfer Schichten zu Tage welche aus sich abwechselnden Schichten von Ton, Silt und Sand mit Einschaltungen von Kalk und Kalksteinen bestehen. Als tonig-sandige Ablagerungen tritt das Untersarmat nordöstlich von Hartberg hervor und reicht bis in die Friedberg-Pinkafeld Bucht. Das Fürstenfelder Becken war zu dieser Zeit im Nordwesten von der Hochzone Walkersorf-Waltersdorf und im Osten von der Süburgenländischen Schwelle begrenzt.

Im Mittelsarmat kommt es auch zur Absenkung und Überflutung dieser Hochzone und im Fürstenfelder Becken erreichen die Ablagerungen des Mittel-Obersarmat ihre

höchste Mächtigkeit mit 600-750m. Im Westen und Süden des Gnaserbeckens liegt das Mittelsarmat als grauer Tonmergel vor und tritt südöstlich von Graz zu Tage.

Im Obersarmat kommt es durch eine erneute Regression zur Ablagerung des typischen sarmatocarinthischen Schotter welcher im südlichen Gnaser Becken und südlich von Gleichenberg mit einer Mächtigkeit von 30m vorliegt. Über diesem Schottern lagerten sich tonig-mergelige bis sandige Sedimente ab. Zu dieser Zeit war das Becken im östlichen Teil durch marine, und im westlichen Teil von limisch-fluviatiler Sedimentation geprägt (Ebner und Sachsenhofer 1991).

#### 4.1.5. Pannonium

Im Pannonium setzt die Aussüßung welche im Sarmation durch die Abschnürung der Parathetys einsetzte weiter fort wodurch es zu einer starken Veränderung und zur Entwicklung endemischer Fauna in diesem Binnenmeer kam. Die Sedimentation pannoner Sedimente beginnt im ossteirischen Becken erst mit dem Pannon B, Pannon A fehlt weitgehend.

Das Pannon B wird als Sande mit *Melanopsis impressa* und Tonmergel mit *Congeria* vorgefunden. Die Sedimente bestehen aus Tonmergel, Sandschnüren und Kieslagen und treten hauptsächlich im Raum Hartberg bis in die Friedberg-Pinkafeld auf.

Das Pannon C kann liegt östlich von Graz und großflächig im Beckenzentrum als fluviatil, zyklische Abfolgen aus Sanden, Tonen und Kiesen vor. Diese zyklische Ablagerung wird vermutlich teils durch klimatische Änderungen und teils durch die Tektonik verursacht.

Die Sedimente des Pannon D, E bestehen aus einer Wechselfolge von Sanden und fossilreichen Tonen mit Einschaltungen von Lignit.

Sedimente des Pannon F,G und H sind nur im Ostern an der Südburgenländischen Schwelle zu finden wo es zu einer Ablagerung von Sanden, Tonen, Mergel, Süßwasserkalken und Kiesen kam (Domberger et al. 2005).

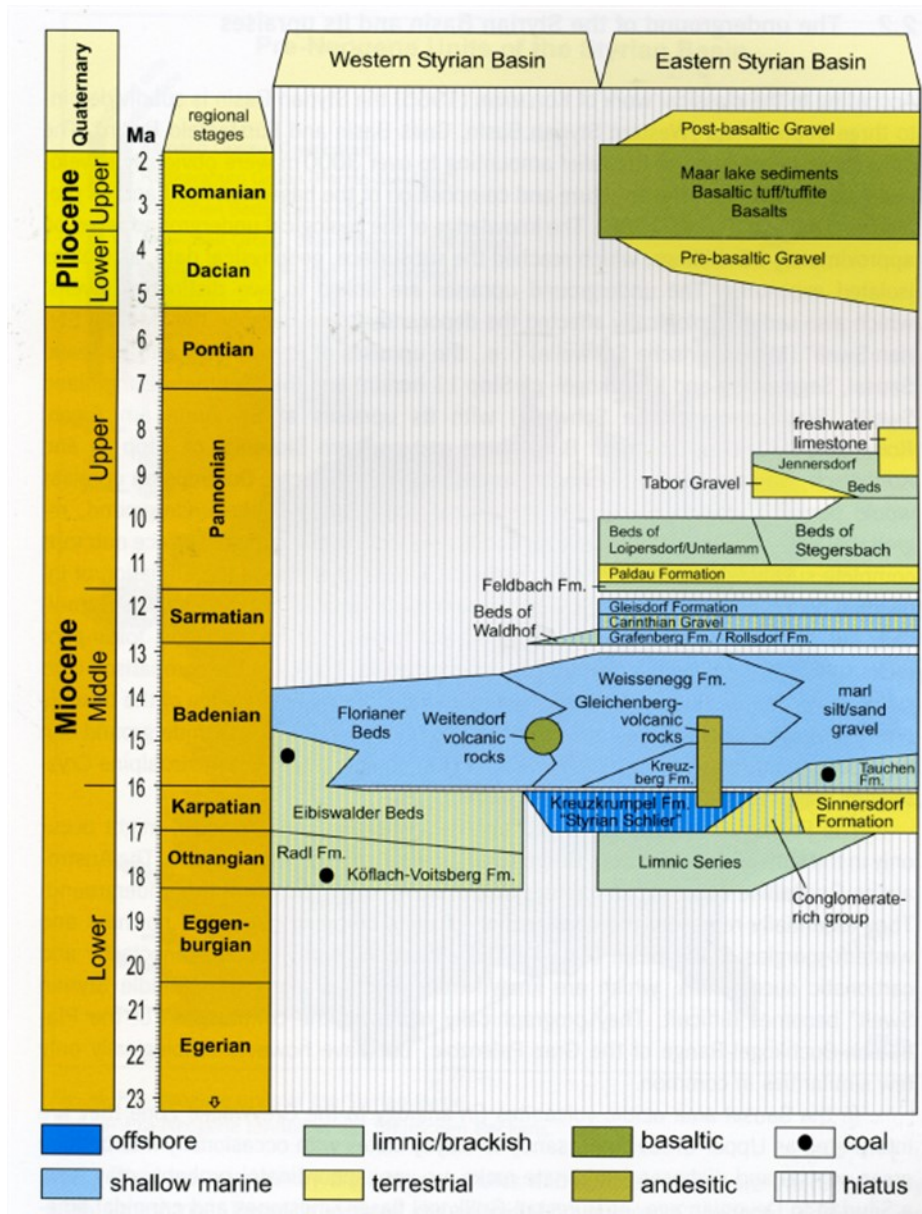


Abb. 12: Stratigraphische Tabelle des Neogenen des West- und Oststeirischen Becken (Gross et al. 2007; Piller et al. 2004)

## 5. Das Projektgebiet

### 5.1. Geologische Gegebenheiten im 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 Baden mit einer Mächtigkeit von etwa 30m vor. Die Ablagerungen zeigen eine Schichtung mit einer Wechsellagerung aus Schottern und fein- bis mittelkörnigen Quarzsanden welche mit 5-10° nach Richtung Süden einfallen.

Im Hangend des Aufschlusses beginnt der Aufschluss mit einer Schicht aus Schotter deren Mächtigkeit etwa 3m beträgt. Darunter folgt eine Schicht aus feinsandigem Material deren Mächtigkeit mit maximal 3m am höchsten ist und in Richtung SW abnimmt. Darauf folgt wieder eine 5m mächtige Schicht aus Schotter welche wieder in einen mittelkörnigen Sand übergeht und die restliche Mächtigkeit der der Sandgrube einnimmt (Abb. 13). Der gesamte Aufschluss wird von einem System aus steil einfallenden Störungen durchzogen, deren Streichrichtungen in etwa dem Störungslinament des oststeirischen Beckens entsprechen.

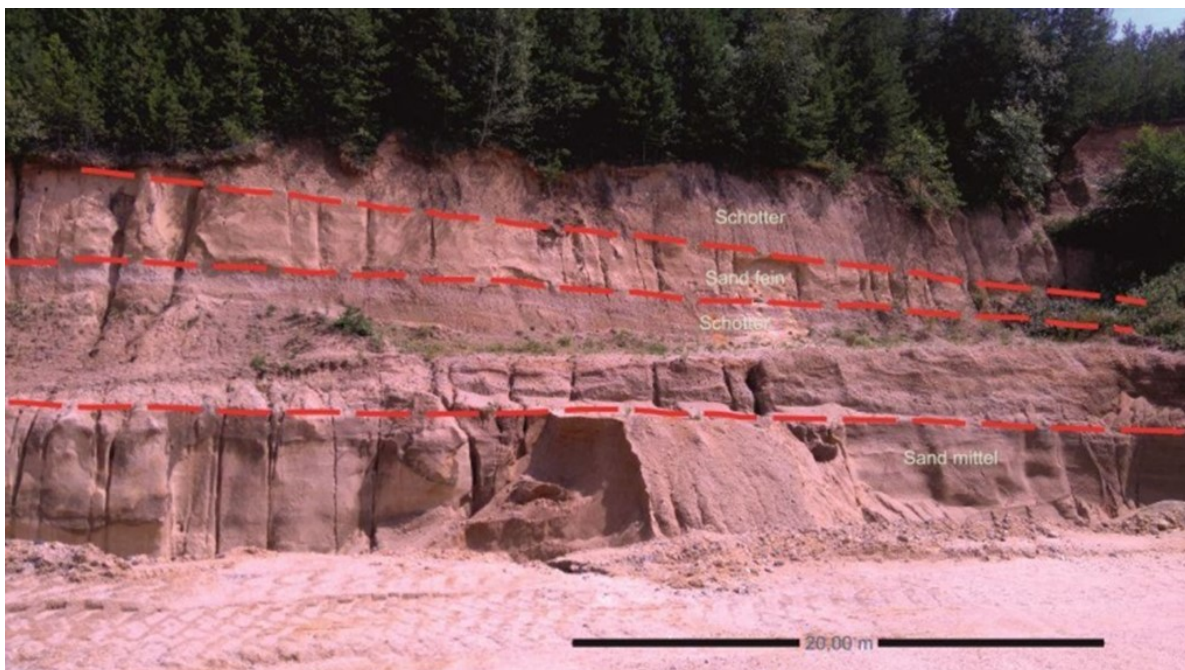


Abb. 13: Schichtung der Sedimente in der Sandgrube Ulreich.  
Von Legend nach Hangend: Sand mittel – Schotter – Sand fein – Schotter.

## 5.2. Messungen und Probennahme

Tabelle 1: Übersichtstabelle der Messungen im Projektgebiet

	Messmethode	Fläche bzw. Volumen /Messung	Anzahl der Messungen	Messfläche	Bemerkung
<b>SW-NO Wand</b>	Tiny Perm II	0,6cm <sup>2</sup> /0,38-3cm <sup>3</sup>	1680	200x210cm	Von Störung durchzogen
	Stechzylinder	100cm <sup>3</sup>	8		
<b>OSO-WNW Wand</b>	Tiny Perm II	0,6cm <sup>2</sup> /0,38-3cm <sup>3</sup>	1440	200x180cm	
	Stechzylinder	100cm <sup>3</sup>	10		
<b>Vertikal</b>	Tiny Perm II	0,6cm <sup>2</sup> /0,38-3cm <sup>3</sup>	58	Verteilt auf 0,66m <sup>2</sup>	
	Stechzylinder	100cm <sup>3</sup>	10		
	Infiltrimeter	0,22m <sup>2</sup>	3	Jeweils 0,22m <sup>2</sup>	Messungen mit und ohne Störungen
<b>Störungen</b>	Tiny Perm II	0,6cm <sup>2</sup> /0,38-3cm <sup>3</sup>	58		Messungen aus verschiedenen Störungsrichtungen
	Stechzylinder	100cm <sup>3</sup>	8		

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 Ringinfiltrimeter durchgeführt. Dieser Aufschluss ermöglicht es die Messungen für die horizontale Durchlässigkeit an einer SW-NO und einer OSO-WNW verlaufender Wand zu durchzuführen. Für die vertikale Durchlässigkeit konnten Messungen an einer direkt darüberliegenden horizontalen Fläche gemacht werden (Abb. 15).



Abb. 14 Tiny Perm Messungen an einem aufgespannten Netz.

*Links: SW-NO Wand. Rechts: OSO-WNW Wand*

### 5.2.1. Südwest – Nordost Wand

Zur Messung mit dem Handpermeameter wurde ein Netz mit einer Rasterweite von 5x5cm aufgespannt um die Messungen in einem konstanten Abstand durchführen zu können. Das Netz wurde in einem Bereich aufgespannt welcher auch von einer markanten Störung durchzogen wird. Die Maße der abgerasterten Fläche betragen dabei 2,00x2,10m und es wurden insgesamt 1680 Messungen generiert (Abb. 14). Des Weiteren wurden auf den Messbereich aufgeteilt noch 8 Stechzylinderproben entnommen.

### 5.2.2. Ost-Südost – West-Nordwest Wand

In diesem Bereich betragen die Maße der abgerasterten Fläche 2,00x1,80m an welcher insgesamt 1480 Messungen mittels Tiny Perm gemacht und 10 Proben mit Stechzylinder entnommen wurden (Abb. 10). Dieser Bereich bestand durchgehend aus homogenen Sand und wurde nicht von Störungen durchzogen. Jedoch lag im diesem Aufschlussbereich eine Bankung vor. Makroskopische konnte aber kein Unterschied in der Korngröße festgestellt werden

### 5.2.3. Messung der vertikalen Durchlässigkeit

An der darüberliegenden horizontalen Fläche konnten 3 Infiltrometertests durchgeführt werden. Die Ringe wurden so platziert, dass auch ein möglicher Einfluss durch Störungen auf die Infiltrationsrate bestimmt werden konnte. Infiltrometertest 1 wurde ohne eine Störung durchgeführt, Test 2 im Bereich einer Störung und Test 3 über einem Bereich an dem sich 2 Störungen kreuzen. Zusätzlich wurden im Bereich der Infiltrometertest auch Messungen mittels Tiny Perm gemacht und jeweils 3 – 4 Stechzylinder entnommen (Abb. 15).

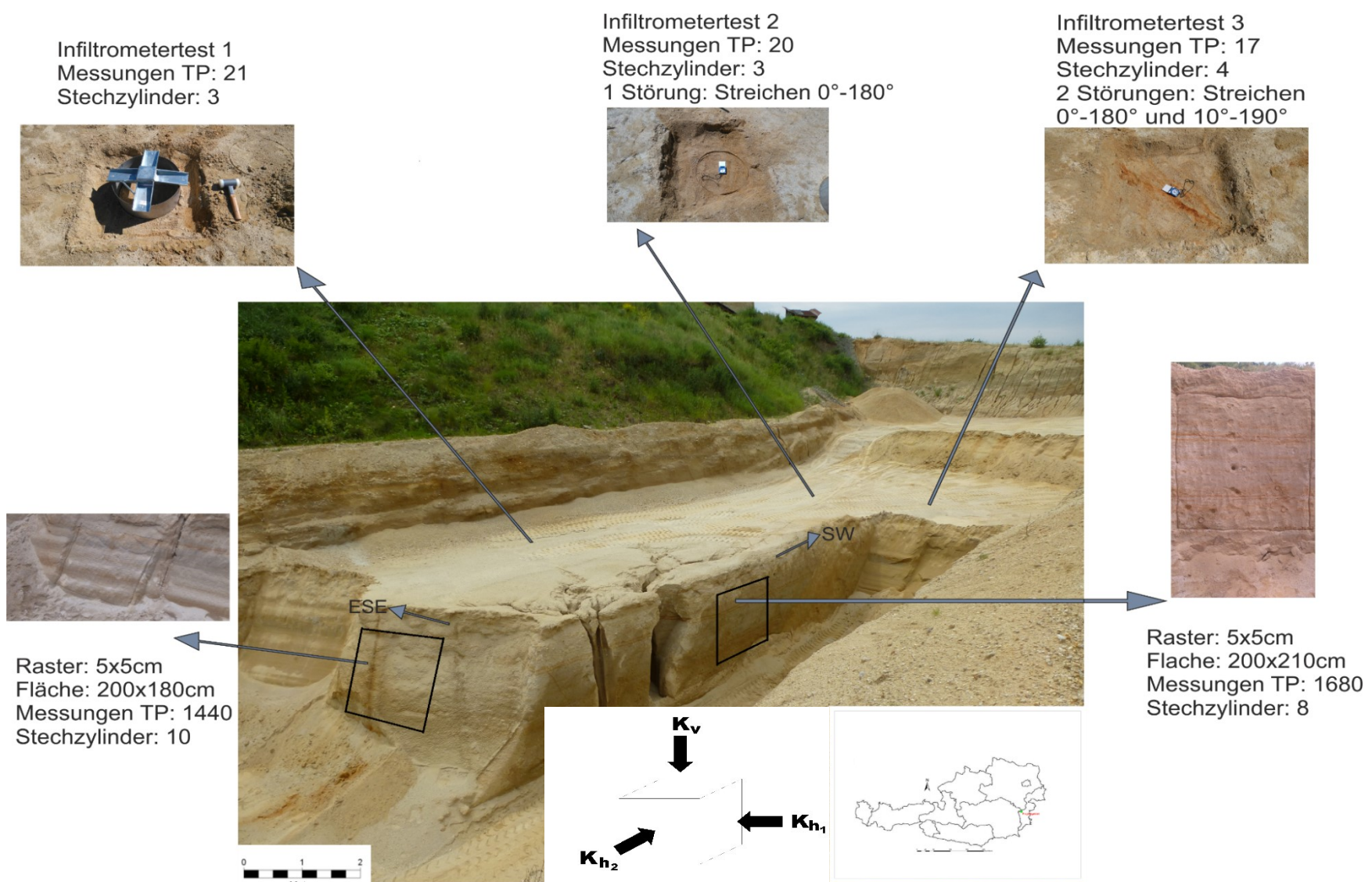


Abb. 15: Ausgewählten Messareale sowie die Messmethoden  
 Abbildung zeigt den 3-dimensional aufgeschlossenen Bereich an dem die Messungen durchgeführt wurden. Kleine Abbildungen zeigen die Detailaufnahme des Messbereichs sowie die Anzahl der Messungen und Messmethode an den gewählten Punkten. Würfel zeigt Skzze der 3 verschiedenen Richtungen in welche gemessen wurden.  $K_v$  = Vertikale Durchlässigkeit,  $K_h$  = Horizontale Durchlässigkeit

## 6. Methoden

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.

### 6.1. Tragbarer Luftpermeameter (Tiny Perm II)

Eine effektive, schnelle und kostengünstige Möglichkeit zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit bieten die tragbaren Luftpermeameter von (Vindum Engineering) mit ihrer Tiny Perm Reihe. Die Vorrichtung besteht aus einem Vakuumzylinder mit Mikroprozessor und Steuergerät (Abb. 16). Um die Durchlässigkeit im Gelände zu messen wird das Gerät gegen eine Fläche gepresst und der Kolben wird niedergedrückt um ein Vakuum zu erzeugen. Dabei wird Luft aus den Poren der Probe gesaugt, wobei die Gasströmungsrate und der Druck gemessen werden. Die so erhaltenen Werte können durch eine ausrüstungsspezifische Eichkurve, die vom Hersteller bereitgestellt wird, in die Permeabilität ( $K_a$ ) in mD ( $1\text{Darcy} = 9,86923 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ ) und mit Hilfe der Gleichung von Iversen et al.(2003) in die gesättigte Durchlässigkeit ( $K_s$ ) in m/s umgerechnet werden.

Gleichung (6.1) ist die vom Hersteller (Vindum Engineering) bereitgestellte Umrechnung des Tiny Perm Wertes in Permeabilität:

$$\text{Tiny Perm Wert} = -0,8206 \cdot \log_{10}(K_a) + 12,8737 \quad (6.1)$$

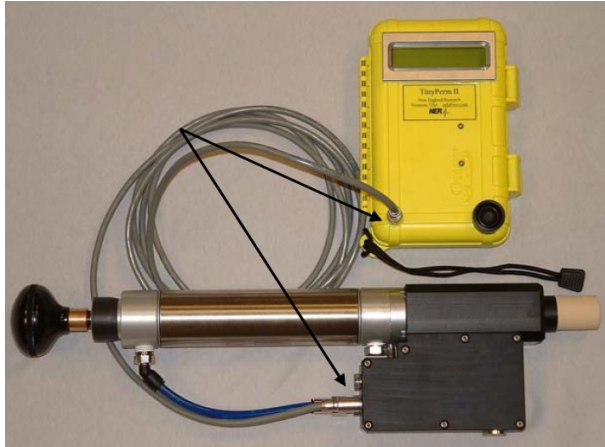


Abb. 16: Tiny Perm: Gerät und Messung

Links: Mikroprozessor, Steuergerät und Vakuumzylinder des Tiny Perm II. Recht: Messung an einem Sandaufschluss durch Anpressen des Gerätes an die Oberfläche und Niederdrücken des Kolbens.

Umrechnung der Permeabilität in die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit nach Iversen et al.(2003):

$$K_s = \frac{10^{1,22 \cdot \log_{10}(K_a \cdot 9,86923 \cdot 10^{-16}) + 13,93}}{86400} \quad (6.2)$$

Das Probenvolumen, das durch eine Tiny Perm Messung miteinbezogen wird, beträgt nur wenige mm<sup>3</sup>. Gogging et al.(1988)und Jensen et al. (1994) fanden in ihren Arbeiten, dass das Volumen, welches bei einer Permeametermessung in einem porösen Medium miteinbezogen wird, durch 2-4-mal dem inneren Radius der Spitzendichtung definiert wird. Der Luftpermeameter Tiny Perm II hat einen inneren Durchmesser von 9mm, folglich wird bei einer Messung die Durchlässigkeit bis in eine Tiefe von 9-18mm berücksichtigt. Die Messdauer beträgt je nach Permeabilität von wenigen Sekunden bis zu mehreren zehner Minuten (Rogiers et al. 2014).

## 6.2. Stechzylinder und Constant Head Permeameter

An jedem Aufschluss wurden mehrere ungestörte Proben mittels Stechzylinder (100cm<sup>3</sup>) entnommen um anschließend die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit und andere wichtige bodenphysikalische Parameter zu ermitteln.

### 6.2.1. Ermittlung der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit

Zur Ermittlung der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit wurde eine Constant-Head Permeametertest durchgeführt. Dazu wurden die Proben soweit in den mit Wasser gefüllten Permeameter eingesetzt ohne dass das Wasser über den oberen Rand der Probe ansteigt. Um eine völlige Sättigung der Probe zu garantieren wurden diese dann für 24 Stunden gesättigt.

Nach Sättigung der Proben wurde der Wasserspiegel im Permeameter angehoben und so lange gewartet bis sich im Ringhalter derselbe Wasserspiegel einstellt. Durch Einsetzen eines mit Wasser gefüllten Saughebers wird das Wasser in eine Bürette geleitet und ein hydraulischer Gradient erzeugt. Durch diesen Gradienten kann das Wasser von unten durch die Probe nach oben fließen. So kann der Wasserfluss durch die Probe in ml/Zeit gemessen werden. Die Ergebnisse des Tests können mit dem Darcy Gesetz für eindimensionale, vertikale Strömung berechnet werden, wobei gilt (Eijkelkamp Agrisearch Equipment 2013):

$$V = K \cdot i \cdot A \cdot t \quad (6.3)$$

Nach Umformung von (6.3) kann K wie folgt berechnet werden:

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad (6.4)$$

<i>V...Wasservolumen das durch die Probe fließt</i>	<i>cm<sup>3</sup></i>
<i>K...Durchlässigkeitsbeiwert</i>	<i>cm/Zeit</i>
<i>h...Wasserspiegelunterschied inner-/außerhalb der Probe</i>	<i>cm</i>
<i>L...Länge des Stechzylinders</i>	<i>cm</i>
<i>i...Steighöhengradient (h/L)</i>	<i>-</i>
<i>A..Querschnitt der Probe</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>
<i>t...Zeit die V für den Durchfluss benötigt</i>	<i>s, min....</i>

## 6.2.2. Ermittlung bodenphysikalischer Parameter

Neben der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit wurden auch die Trockendichte ( $\rho_{\text{trocken}}$ ), Feststoffdichte ( $\rho_s$ ), Porosität ( $\varphi$ ) und Feldsättigung ( $\theta_{\text{Feld}}$ ) ermittelt. Dazu wurden die Proben vor Sättigung im Permeameter ( $W_{\text{feld}}$ ), nach Sättigung ( $W_{\text{sat}}$ ) und nach 2 Tagen im Trockenschrank ( $W_{\text{trocken}}$ ) gewogen. Nach Abzug des Gewichts ( $W_{\text{Ring}}$ ) des Stechzylinders und des Volumens der Probe ( $V_{\text{Probe}}$ ) konnten diese Parameter wie folgt berechnet werden:

### Trockendichte:

$$\rho_{\text{trocken}} = \frac{(W_{\text{trocken}} - W_{\text{Ring}})}{V_{\text{Probe}}} \quad (6.5)$$

### Porosität:

$$\varphi = \frac{W_{\text{sat}} - W_{\text{trocken}}}{V_{\text{Probe}}} \quad (6.6)$$

### **Feststoffdichte:**

$$\rho_s = \frac{\rho_{trocken}}{1-\varphi} \quad (6.7)$$

### **Feldsättigung:**

$$\theta_{Feld} = \frac{W_{Feld} - W_{trocken}}{W_{sat} - W_{trocken}} \quad (6.8)$$

## **6.3. Ringinfiltrrometer**

### **6.3.1. Vorgehensweise Einzelringinfiltrrometer**

Zur Ermittlung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bzw. zur Bestimmung der Infiltrationsrate am Feld eignen sich sowohl Doppel- als auch der einfache Ringinfiltrrometer. Mit Hilfe beider Messmethoden wird eine bestimmte Wassermenge, die pro Oberflächenbereich und Zeiteinheit in den Boden infiltriert gemessen. Beim Doppelring verhindert der äußere Ring ein zusätzliches seitliches Versickern, wodurch eine exaktere Analyse ausgeführt werden kann (Eijkelkamp 2015).

Aufgrund der sehr hohen Durchlässigkeit des Sandes im Projektgebiet wurde ein einfacher Ringinfiltrrometer verwendet, da es fast unmöglich war den Wasserspiegel in Innen- und Außenring konstant zu halten. Beim einfachen Ringinfiltrrometer-Verfahren wurde ein Metallring mit einem Durchmesser von 53cm und einer Höhe von 25cm verwendet welcher in den Boden bis in eine Tiefe von 5cm eingesetzt wurde. Während der Messung wurde versucht ein konstanter Wasserspiegel von 15-16cm im Ring zu halten bis eine konstante Infiltrationsrate eingetreten ist. Das Absinken des Wasserspiegels wurde je nach Infiltrationsrate alle 1-2 Minuten via eine Messskala dokumentiert. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde überwacht, bis ein quasistationärer Zustand eingetreten war. Ab diesem Zeitpunkt wird ein konstanter Wasserdruck und eine

gleichmäßige Wasserfülle angestrebt um aus den gewonnenen Daten die feldgesättigte hydraulische Leitfähigkeit,  $K_{fs}$  abzuschätzen (Bagarello und Sgroi 2004). Dieses einfache Grundprinzip gilt auch für den Doppelringinfiltrimeter und kann mit unterschiedlichen Ringdurchmessern variiert werden. Je nach Ringgröße und geologischen Grundvoraussetzungen sollten diese angepasst und mit den jeweiligen mathematischen Kenngrößen berechnet werden.

### 6.3.2. Auswertung der Ergebnisse

Zur Auswertung der Ergebnisse der Einzelringinfiltrimeter Versuche wurde die Arbeit von (Reynolds und Elrick 1990) verwendet. Hier werden die bodenhydraulischen Eigenschaften, ein Geometriefaktor welcher abhängig ist vom Ringradius und der Eindringtiefe des Ringes in den Boden und die Füllhöhe (siehe Abb. 17) für die Kalkulation der hydraulischen Durchlässigkeit berücksichtigt.

Sie gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und das Matrix-Flux-Potential können somit wie folgt berechnet werden.

#### **Geometriefaktor:**

$$Ge = 0,316 \cdot \left(\frac{d}{a}\right) + 0,184 \quad (6.9)$$

#### **Variable T:**

$$T = [a(\alpha \cdot H + 1) + Ge \cdot \alpha \cdot \pi \cdot a^2] \quad (6.10)$$

## Matrix-Flux-Potential:

$$\phi_m = (Ge \cdot Q_s)/T \quad (6.11)$$

## Gesättigte hydraulische Durchlässigkeit:

$$K_{fs} = (\alpha \cdot Ge \cdot Q_s)/T \quad (6.12)$$

*Ge*..... Geometriefaktor

*d*..... Eindringtiefe des Ringes in den Boden

*a*..... Ringradius

*T*..... Variable

*α*..... Bodenparameter der exponentiellen Beziehung zwischen hydraulische Leitfähigkeit und der hydraulischen Druckhöhe (für Sand  $24\text{-}36\text{m}^{-1}$ ).

*H*..... Wasserhöhe im Ring

*K<sub>fs</sub>*..... Gesättigte hydr. Durchlässigkeit [m/s]

*Q<sub>s</sub>*..... Stationäre Infiltrationsrate [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

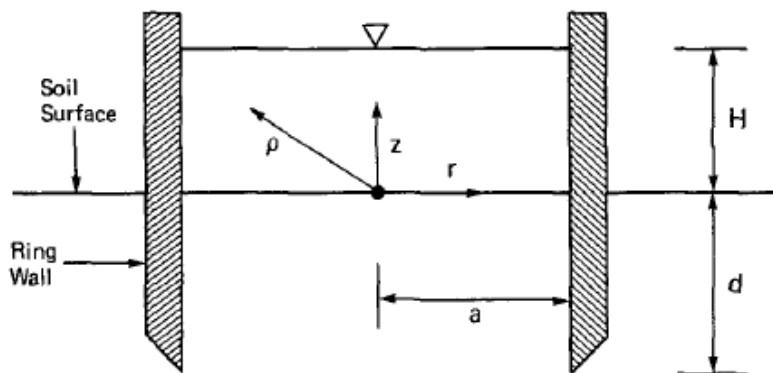


Abb. 17: Schematische Darstellung eines Einzelring-Infiltrometers (Reynolds und Elrick 1990)  
Versuchs. *H* = Höhe des Wasserspiegels im Ring, *d* = Eingrabetiefe des Ringes in den Boden, *a* = Radius des Ringes, *ρ*, *z*, *r* = räumliche Koordinaten.

## 6.4. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der gesamten Daten erfolgte mit dem Statistikprogramm R. Für die Standardauswertung wurden die Grundpakete des Programms verwendet. Das Kriging der Tiny Perm Daten erfolgte mit Hilfe der Packages geoR (Ribeiro und Diggle 2001) und geostat (Pebesma und Graeler 2004).

### 6.4.1. Kriging

Um die räumliche Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit der Tiny Perm Messungen visuell darstellen zu können, wurden die Daten welchen in einem Abstand von 5cm gemessen wurden, mittels Kriging auf ein Grid von 2,5cm Punktabstand interpoliert.

Bei der Datenaufbereitung wurden die Messwerte einem Koordinatensystem zugeteilt durch das mit den vorher erwähnten R Pakete ein Variogrammodell erstellt wurde. Ein Variogramm ist eine Beschreibung der Beziehung zwischen den Messpunkten die eine Stichprobe bilden. Aus den Daten kann für einen bestimmten Abstand oder Abstandsklasse ein Variogramm berechnet werden nach:

$\gamma(h)$	Semivarianz
$n(h)$	Anzahl Wertepaare mit dem Abstand h
$h$	Abstand zwischen einem Wertepaar
$Z_{(x_i)}$	Wert am Ort x
$Z_{(x_i+h)}$	Wert am Ort x+h

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad (6.13)$$

Das erhaltene Variogramm kann durch Änderung der Abstandsklassen oder der Anzahl der Daten die für die Berechnung verwendet werden eine Änderung des Variogramms bewirken. Aus den berechneten Datenpunkte des Variogramms (empirisches Variogramm) kann nun durch Anpassung eines Modells welches einer bestimmten Funktion entspricht ein theoretisches Variogramm erstellt werden (Webster und Oliver 2007). Ist die Differenz zwischen zwei Messwerten klein so ist auch  $\gamma(h)$  klein und die

beiden Werte sind gut korrelierbar. Mit zunehmenden Abstand zwischen den Messpunkten werden auch die Werte unterschiedlicher und  $\gamma(h)$  nimmt zu. Abb. 18 zeigt ein Variogramm mit den wichtigsten Parametern (Blöschl 2006).

### **Nugget:**

Ist die Varianz von zwei Messwerten mit sehr kleinem Abstand zueinander. Er kann durch Messfehler entstehen oder durch Mikrovariabilitäten die in Entfernungen auftreten die kleiner sind als der Abstand der Messwerte.

### **Sill:**

Ist die Varianz der gesamten Variablen und entspricht dem Niveau an dem das angepasste Modell einen flachen Verlauf annimmt. Ein hoher Sill bedeutet, dass die Variablen stärker abweichen. Als Partial Sill wird der Sill minus dem Nugget bezeichnet.

### **Korrelationslänge (Range)**

Ist die Distanz vom Nullpunkt bis zum Abflachen der Modellkurve. Eine große Range bedeutet, dass die Variablen über eine größere Entfernung korrelierbar sind

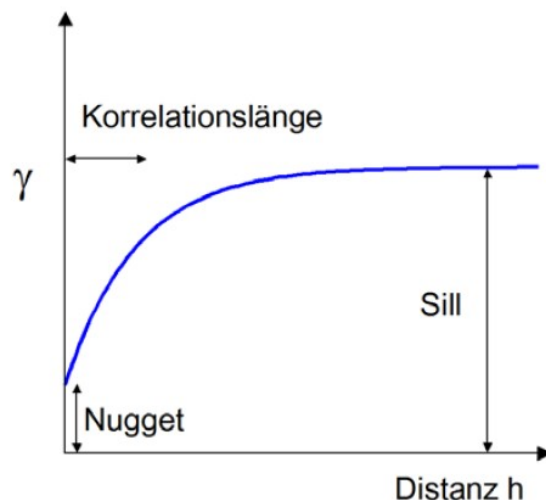


Abb. 18: Variogramm mit Parametern Nugget, Sill und Range (Blöschl 2006)

Als nächstes wird das berechnete Variogramm für die Interpolation mittels Kriging verwendet. Für die Interpolation gibt es eine Anzahl an geostatistischen Methoden wie Ordinary Kriging, Universal Kriging oder Nearest Neighbor Kriging welche herangezogen werden können. Die meisten Methoden verwenden dafür best linear unbiased estimators, eine lineare Schätzung bei der der quadratische Fehler so klein wie möglich sein soll. Dabei wird angenommen dass der Punkt welcher interpoliert wird das gewichtete Mittel der Datenwerte ist (Blöschl 2006).

#### 6.4.2. Häufigkeitsverteilung und Quantil-Quantil Plot

Eine Häufigkeitsverteilung dient der Darstellung der Verteilung der Daten nach ihrer Häufigkeit in Klassen. Dazu werden alle Daten nach ihrer Größe sortiert und der jeweiligen Klasse zugeteilt. Daraus ergibt sich die absolute Häufigkeit aus welcher die Verteilung, Median, Standardabweichung und Streuung abgeschätzt werden kann. Um die Verteilung der Daten besser vergleichen zu können wurde in dieser Arbeit die relative Häufigkeit verwendet. Sie ergibt sich aus der Anzahl der Daten welche sich in einer Klasse befinden als Anteil zur Grundgesamtheit. Die Werte der relativen Häufigkeit liegen immer zwischen 0 und 1.

Ein Quantil-Quantil Diagramm vergleicht die Quantile der empirischen Verteilung der Datenmenge mit den theoretischen Quantilen einer Normalverteilung der Daten. Liegen die Datenpunkte auf der Gerade der theoretischen Quantile, kann eine Normalverteilung angenommen. Diese Diagramme dienen zu einer ersten Abschätzung der Verteilung der vorliegenden Daten, statistische Tests können dadurch jedoch nicht ersetzt werden.

### 6.4.3. Statistische Tests auf Normalverteilung

#### **Shapiro- Wilk Test**

Ein Signifikanztest überprüft ob die Grundgesamt einer Stichprobe normalverteilt ist oder nicht. In dieser wurde der Shapiro-Wilk Test angewendet. Er ist geeignet für Datenmengen von  $3 < n < 2000$  und hat eine sehr hohe Teststärke. Daher erschien diese Art von Test als am besten geeignet für die vorliegenden Daten. Angegeben wird das Ergebnis im Statistikprogramm „R“ als p-Wert. Liegt der p-Wert über dem angegebenen Signifikanzniveau, kann eine Normalverteilung angenommen werden.

Der p-Wert ist eine Angabe welche aussagt wie stark die Nullhypothese  $H_0$  durch die vorliegenden Daten unterlegt wird. Ist der p-Wert zu klein, kann die Nullhypothese nicht unterstützt werden und  $H_0$  verworfen, dafür wird die Alternativhypothese  $H_1$  angenommen. Ab wann der p-Wert zur Ablehnung der Nullhypothese führt wird durch das Signifikanzniveau  $\alpha$  bestimmt.  $H_0$  wird erst angenommen, wenn der p-Wert über dem angegebenen Signifikanzniveau liegt (Bredner B., 2017)

$p \leq \alpha$   $H_0$  wird verworfen, es liegt keine Normalverteilung vor

$p > \alpha$   $H_0$  wird beibehalten, eine Normalverteilung liegt vor

## 7. Resultate

### 7.1. Horizontale Durchlässigkeit SW-NO Wand

An der SW-NO Wand wurden insgesamt 1680 Messungen mittels Tiny Perm gemacht und 8 Stechzylinder entnommen (siehe Abb. 15) dessen gesättigte hydr. Durchlässigkeit und die bodenphysikalischen Eigenschaften im Labor bestimmt wurden. Die Messfläche beträgt 2,0x2,1m und wurde für die Messungen in ein Raster von 5cm Messabstand eingeteilt. Der Aufschluss besteht aus homogenem mittelkörnigem Sand und wird von einer geringmächtigen (ca. 2cm) Störung durchzogen welche steil in Richtung Westen einfällt (Abb. 19).

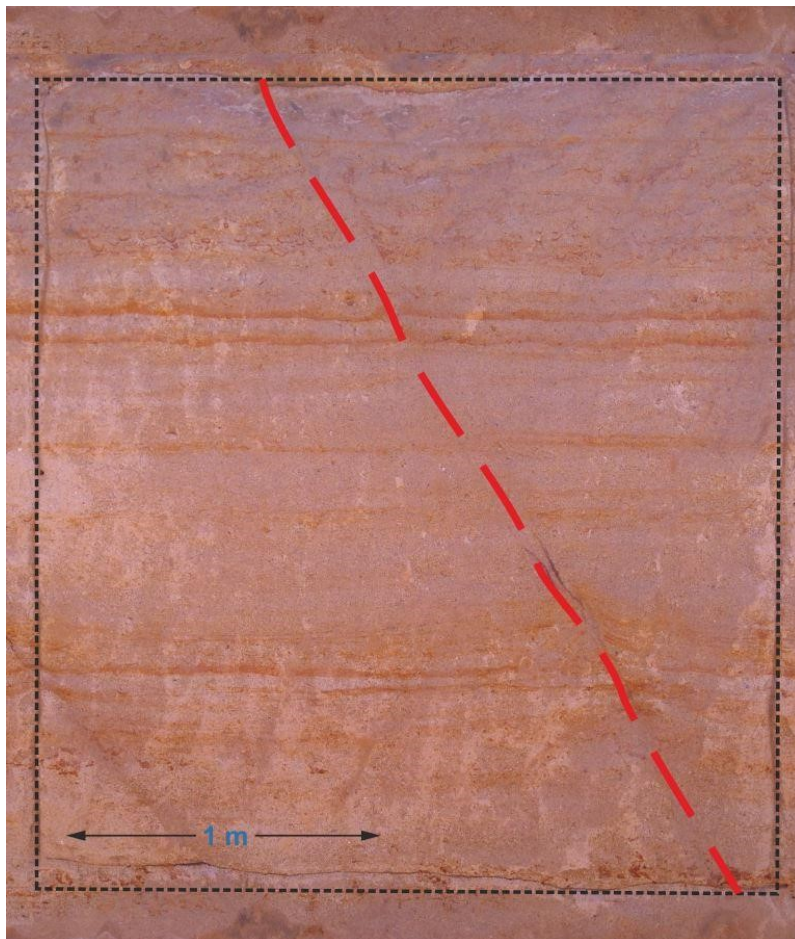


Abb. 19: Messfläche an der SO-NW Wand.  
Rote Linie kennzeichnet die Störung.

### 7.1.1. Ergebnisse Tiny Perm Messungen

Die statistische Auswertung der Tiny Perm Messungen (siehe Tabelle 2) ergab für die mittlere hydraulische Durchlässigkeit einen Wert von  $6,07 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die Auswertung erfolgte einmal mit den Werten der Störung und einmal ohne diese Werte. Die Unterschiede sind jedoch vernachlässigbar klein da die Anzahl der Messungen an der Störung nur etwa 2% der Gesamtanzahl der Messungen ausmacht. Zur Überprüfung der Normalverteilung wurde zum einen eine Häufigkeitsverteilung sowie eine QQ-Plot erstellt (Abb. 20) und zum anderen ein Shapiro-Wilk Test mit einem Signifikanzniveau von  $\alpha=5\%$  durchgeführt. Dabei ergibt sich, obwohl man durch die grafische Darstellung eine Normalverteilung annehmen könnte, sowohl für die Berechnung mit den Messungen der Störungen als auch ohne sie, keine Normalverteilung. Für die Störung welche sich durch den Messbereich zieht wurde eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von  $5,46 \cdot 10^{-5}$  m/s ermittelt. Damit ist die Durchlässigkeit um ein 10faches geringer als die des mittelkörnigen Sandes im restlichen Aufschlussbereich.

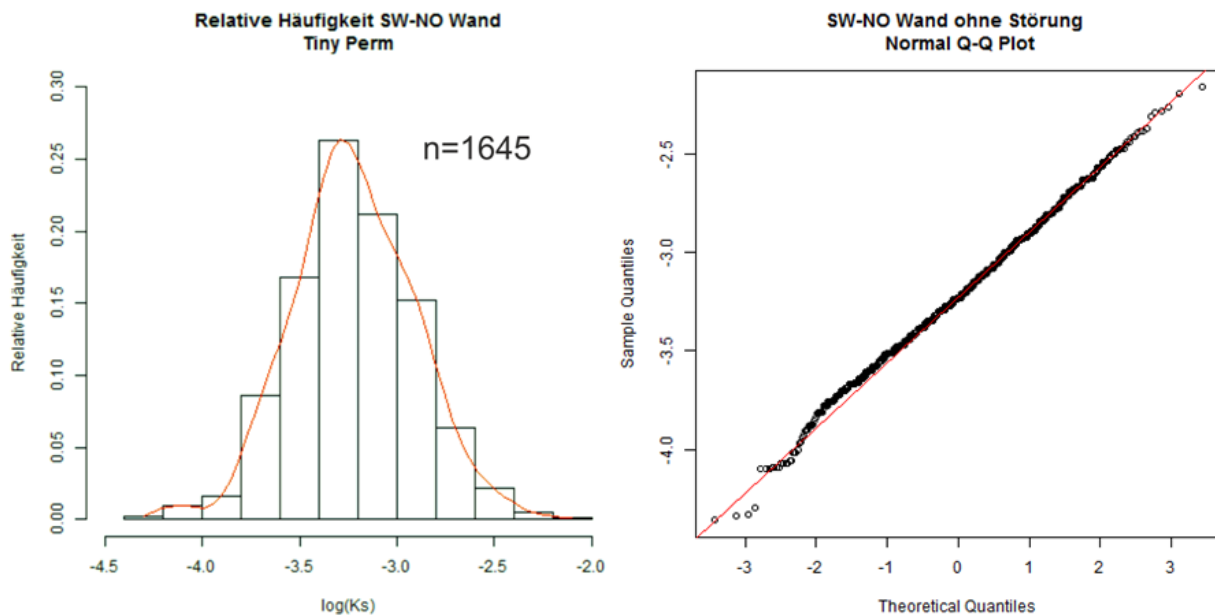


Abb. 20: Verteilung der relativen Häufigkeit und QQ-Plot der Tiny Perm Messungen. Bei der Berechnung wurden die Werte der Störung vernachlässigt. Sowohl Häufigkeitsverteilung als auch QQ-Plot lassen eine Normalverteilung annehmen.

Tabelle 2: Statistische Auswertung der Tiny Perm Messungen der SW-NO Wand.

TP = Tiny Perm,  $\sigma$  = Standardabweichung,  $\sigma^2$  = Varianz, IQR = Interquartilrange. Alle Ergebnisse als  $\log(K_s)$  [m/s] angegeben. Shapiro-Wilk Normalverteilungstest bei 95% Konfidenzintervall als p-Werte angegeben.

Methode	$\sigma$	$\sigma^2$	Median	Mittelwert	IQR	Shapiro-Wilk
TP ohne Störung	±0.319	0.102	-3.23	-3.217	0.42	0.014
TP mit Störung	±0.346	0.120	-3.242	-3.217	0.446	2E-13
Störung	±0.285	0.081	-4.164	-4.263	/	/

### 7.1.2. Ergebnisse Stechzylinder

Insgesamt wurden aus dem Aufschluss 8 Stechzylinderproben entnommen wobei 6 Proben aus den mittelkörnigen Sand und 2 Proben aus der der Störungszone stammen. Bis auf die beiden Proben der Störung wurde die Probennahme Strategie zufällig gewählt da sich aufgrund der Tiny Perm Messungen ansonsten keinerlei ersichtliche Heterogenitäten oder Trends innerhalb des Messbereichs ausmachen ließen.

Auch hier wurde die statistische Auswertung sowohl mit den Werten der Störung als auch ohne diese durchgeführt (siehe Tabelle 2). Dabei ergab sich für die mittlere gesättigte hydraulische Durchlässigkeit des gesamten Aufschlusses einmal  $2,51 \cdot 10^{-4}$  m/s für die Auswertung ohne Störung und  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s für die Auswertung mit Störung. Der Permeameter Test für die beiden Stechzylinder welche aus der Störung entnommen wurden ergibt eine gesättigte hydraulische Durchlässigkeit von  $10^{-4}$  m/s und  $9 \cdot 10^{-5}$  m/s. Die relative Häufigkeitsverteilung und der QQ-Plot (Abb. 21) lassen eine Normalverteilung der Messwerte annehmen welche auch durch einen Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung bestätigt werden kann. Hierbei sollte aber beachtet werden, dass hier mit 6 Proben eine sehr geringe Stichprobenzahl vorliegt.

Tabelle 3: Statistische Auswertung der Stechzylinderauswertung der SW-NO Wand.

TP = Tiny Perm,  $\sigma$  = Standardabweichung,  $\sigma^2$  = Varianz, IQR = Interquartilrange. Alle Ergebnisse als  $\log(K_s)$  [m/s] angegeben. Shapiro-Wilk Normalverteilungstest bei 95% Konfidenzintervall als p-Werte angegeben. Alle Ergebnisse als  $\log(K_s)$  [m/s] angegeben.

Methode	$\sigma$	$\sigma^2$	Median	Mittelwert	IQR	Shapiro-Wilk
SZ ohne Störung	$\pm 0.168$	0.028	-3.610	-3.644	0.2076	0.7214
SZ mit Störung	$\pm 0.2254$	0.0508	-3.723	-3.738	0.3867	0.4457

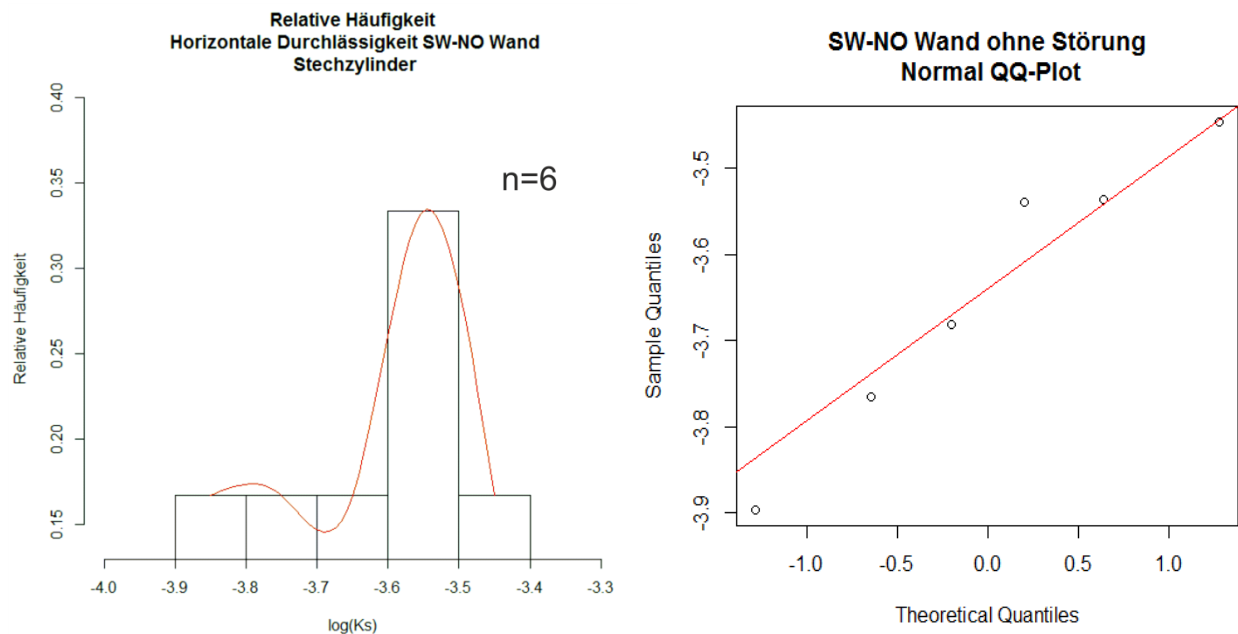


Abb. 21: Verteilung der relativen Häufigkeit und QQ-Plot der der hydr. Durchlässigkeit der Stechzylinder. Bei der Berechnung wurden die Werte der Störung vernachlässigt. Sowohl Häufigkeitsverteilung als auch QQ-Plot lassen eine Normalverteilung annehmen.

### 7.1.3. Bodenphysikalische Parameter

Außer der gesättigten Durchlässigkeit wurden anhand der Stechzylinder auch die Porosität sowie Trocken- und Feststoffdichte bestimmt (Abb. 22). Für die Porosität ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert von 33,81% (Median 34,35%). Der Ausreißer bei 27,5% ist dadurch zu begründen, dass diese Probe an der Störung entnommen wurde.

Die Trockendichte liegt mit einem Mittelwert von  $1,6 \text{ g/cm}^3$  (Median  $1,585 \text{ g/cm}^3$ ) in einem typischen Bereich für mittelkörnige Sande. Auch hier kann die höchste Trockendichte mit  $1,69 \text{ g/cm}^3$  der Probe zugeordnet werden welche aus der Störung entnommen wurde.

Die Feststoffdichte liegt mit Werten zwischen  $2,33\text{-}2,52 \text{ g/cm}^3$  leicht unter dem erwarteten Wert von  $\sim 2,7 \text{ g/cm}^3$  für reinen Quarzsand. Grund dafür könnte ein leichter Materialverlust während der Messungen gewesen sein oder das Vorhandensein von Mineralen mit geringerer Dichte.

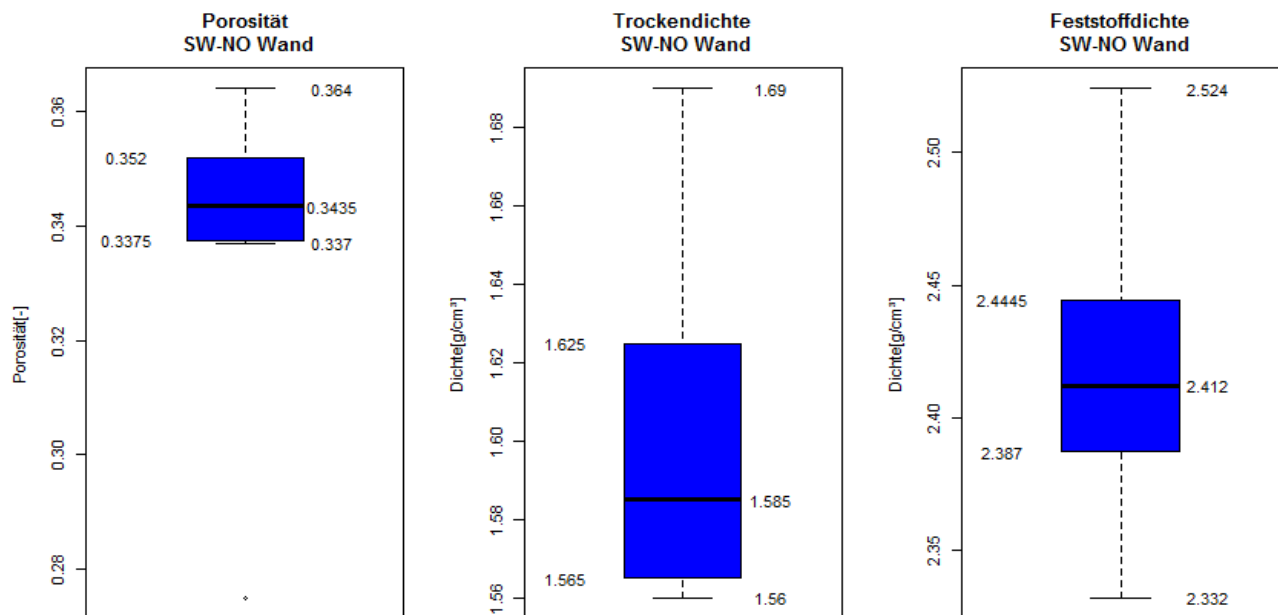


Abb. 22: Auswertung der bodenphysikalischen Parameter der SW-NO Wand

## 7.2. Horizontale Durchlässigkeit OSO-WNW Wand

An der OSO-WNW Wand wurden insgesamt 1436 Messungen mittels Tiny Perm gemacht und 10 Stechzylinder entnommen (siehe Abb. 15) dessen gesättigte hydr. Durchlässigkeit sowie die bodenphysikalischen Eigenschaften im Labor bestimmt wurden. Die Messfläche beträgt 2,0x1,8m und wurde für die Messungen in Raster von 5cm Messabstand eingeteilt. Der Aufschluss besteht aus homogenem mittelkörnigem Sand. Im Messbereich liegt eine Bankung vor, makroskopische lassen sich jedoch keinerlei Heterogenität weder in der Korngröße noch strukturell feststellen (Abb. 23).

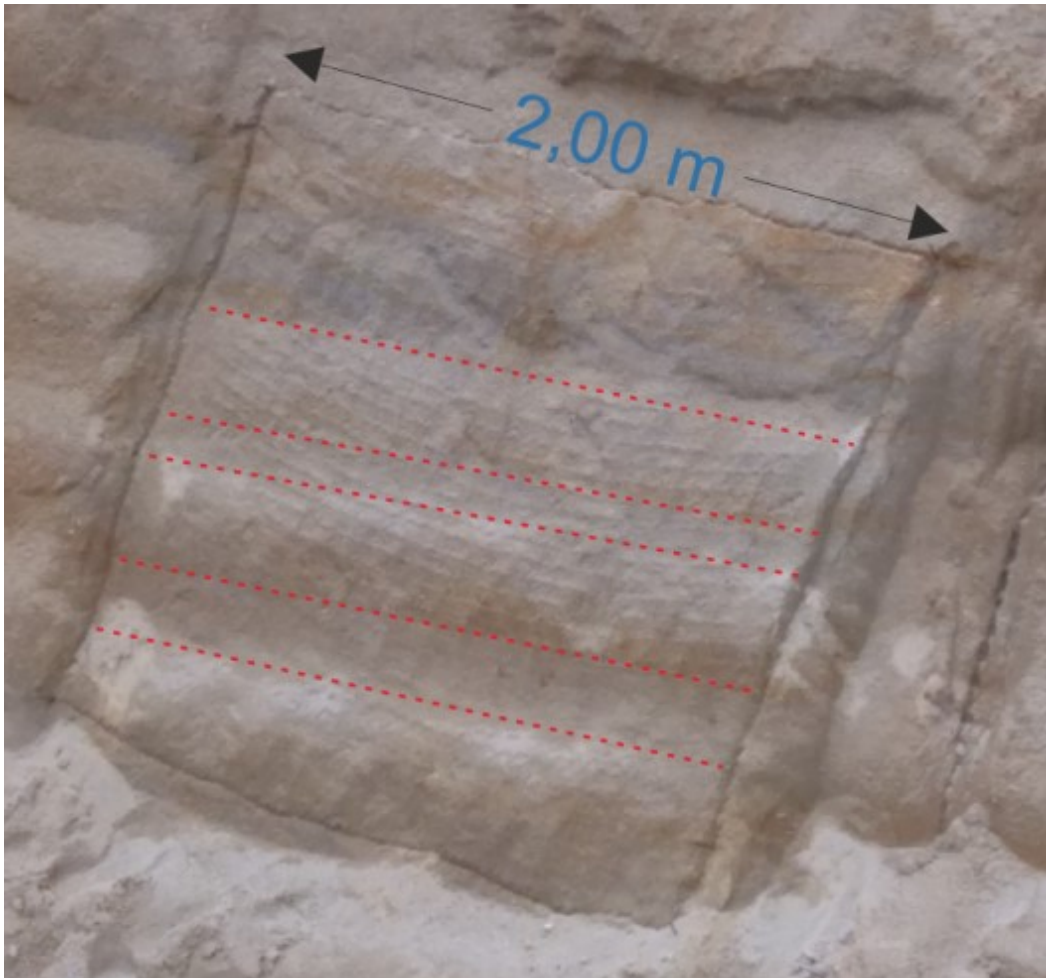


Abb. 23: Messbereich OSO-WNW Wand.

Die Abbildung zeigt die Fläche an der die Messungen durchgeführt wurden. Roten strichlierten Linien zeigen die Bankung im Messbereich.

### 7.2.1. Ergebnisse Tiny Perm Messungen

Die statistische Auswertung der Tiny Perm Messungen (siehe Tabelle 4) ergab für die mittlere hydraulische Durchlässigkeit einen Wert von  $2,94 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ . Zur Überprüfung der Normalverteilung wurde zum einen eine Häufigkeitsverteilung sowie eine QQ-Plot erstellt (Abb. 24) und zum anderen ein Shapiro-Wilk Test mit einem Signifikanzniveau von  $\alpha=5\%$  durchgeführt (Tabelle 4).

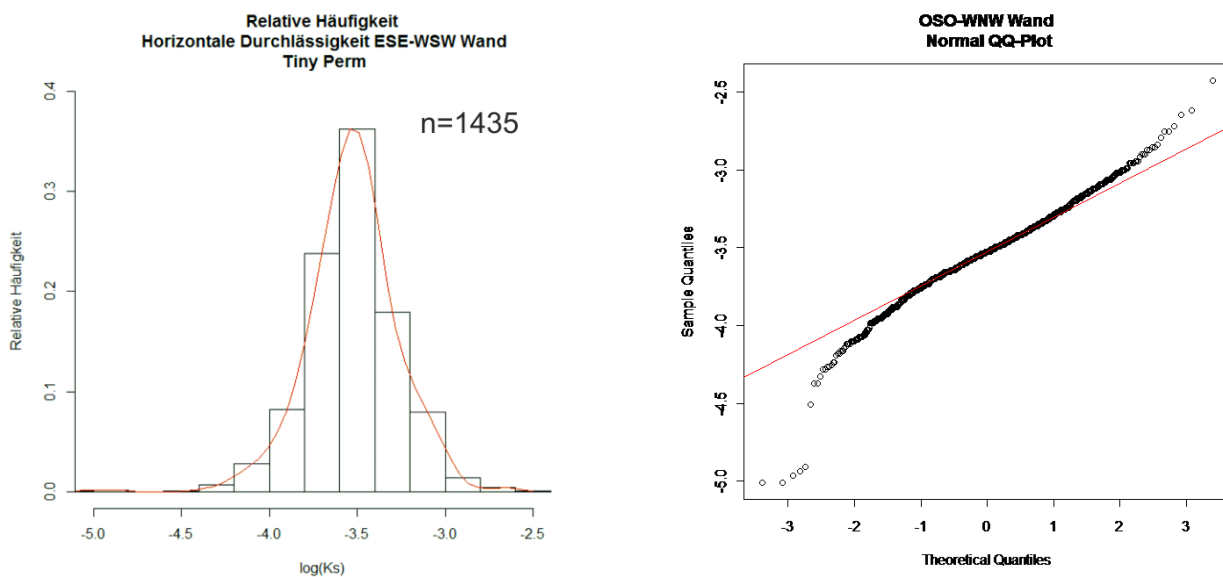


Abb. 24: Verteilung der relativen Häufigkeit und QQ-Plot der Tiny Perm Messungen.  
Besonders aufgrund des QQ-Plot kann eine Normalverteilung ausgeschlossen werden.

Dabei ergibt sich, dass sowohl bei der grafischen Darstellung, vor allem im QQ-Plot, als auch bei den statistischen Tests keine Normalverteilung vorliegt (siehe Tabelle 4). Obwohl im Messbereich eine Bankung sichtbar ist kann diese anhand der Messungen nicht bestätigt werden. Die Messergebnisse scheinen über den gesamten Messbereich eher zufällig verteilt sein.

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Tiny Perm Messungen der OSO-WNW Wand.

TP = Tiny Perm,  $\sigma$  = Standardabweichung,  $\sigma^2$  = Varianz, IQR = Interquartilrange. Alle Ergebnisse als  $\log(K_s)$  [m/s] angegeben. Shapiro-Wilk Normalverteilungstest bei 95% Konfidenzintervall als p-Werte angegeben.

Methode	$\sigma$	$\sigma^2$	Median	Mittelwert	IQR	Shapiro-Wilk
Tiny Perm	$\pm 0.2657$	0.0706	-3.525	-3.532	0.2973	2E-16

### 7.2.2. Ergebnisse Stechzylinder

Insgesamt wurden aus dem Aufschluss 10 Stechzylinderproben entnommen. Eine Probe musste aber verworfen werden, da sich im Labor herausstellte, dass diese nicht ungestört entnommen werden konnte. Dabei wurde die Probennahme Strategie aufgrund der Bankung so gewählt, dass Proben aus den beiden anscheinend unterschiedlichen Schichten entnommen wurden. Auch hier wurde eine statistische Auswertung der Ergebnisse durchgeführt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Statistische Auswertung der Stechzylinderauswertung der OSO-WNW Wand.

TP = Tiny Perm,  $\sigma$  = Standardabweichung,  $\sigma^2$  = Varianz, IQR = Interquartilrange. Alle Ergebnisse als  $\log(K_s)$  [m/s] angegeben. Shapiro-Wilk Normalverteilungstest bei 95% Konfidenzintervall als p-Werte angegeben.

Methode	$\sigma$	$\sigma^2$	Median	Mittelwert	IQR	Shapiro-Wilk
Stechzylinder	$\pm 0.2445$	0.0597	-3.528	-3.557	0.1731	0.0716

Dabei ergab sich für die mittlere gesättigte hydraulische Durchlässigkeit des gesamten Aufschlusses ein  $K_s$ -Wert von  $2,77 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ . Die relative Häufigkeitsverteilung und der QQ-Plot (Abb. 25) lassen eine Normalverteilung der Messwerte annehmen welche auch durch einen Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung bestätigt werden kann.

Auch hier konnte kein signifikanter Unterschied in der Durchlässigkeit zwischen den Proben der Bankung festgestellt werden, da folglich eine bimodale Häufigkeitsverteilung

vorliegen müsste. Eine genauere Untersuchung der Stechzylinderproben auf ihre Kornverteilung wäre daher wünschenswert, wird aber in dieser Arbeit nicht ausgeführt.

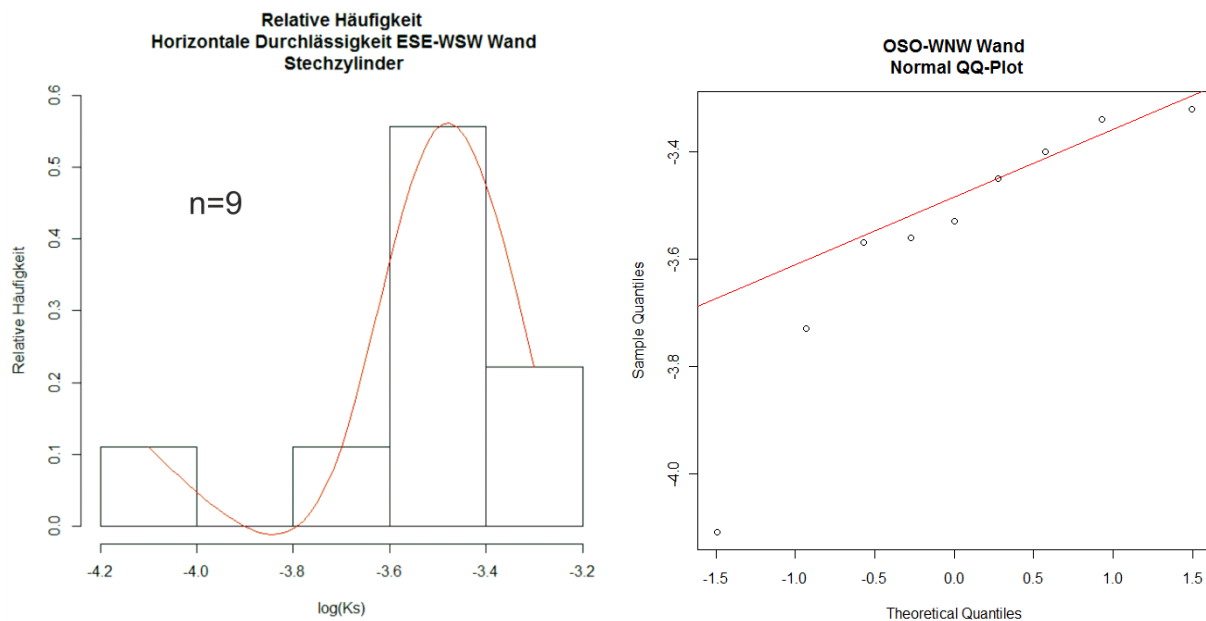


Abb. 25: Verteilung der relativen Häufigkeit und QQ-Plot der der hydr. Durchlässigkeit der Stechzylinder. Sowohl Häufigkeitsverteilung als auch QQ-Plot lassen eine Normalverteilung annehmen.

### 7.2.3. Bodenphysikalische Parameter

Außer der gesättigten Durchlässigkeit wurden anhand der Stechzylinder auch die Porosität sowie Trocken- und Feststoffdichte bestimmt (Abb. 26). Für die Porosität ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert von von 35,8% (Median 35,37%).

Die Trockendichte liegt mir einem Mittelwert von 1,58 g/cm<sup>3</sup> (Median 1,56 g/cm<sup>3</sup>) in einem typischen Bereich für mittelkörnige Sande.

Die Feststoffdichte liegt mit Werten zwischen 2,37-2,58 g/cm<sup>3</sup> leicht unter dem erwarteten Wert von ~2,7g/cm<sup>3</sup> für reinen Quarzsand. Grund dafür könnte wie bei der SW-NO ein leichter Materialverlust während der Messungen gewesen sein.

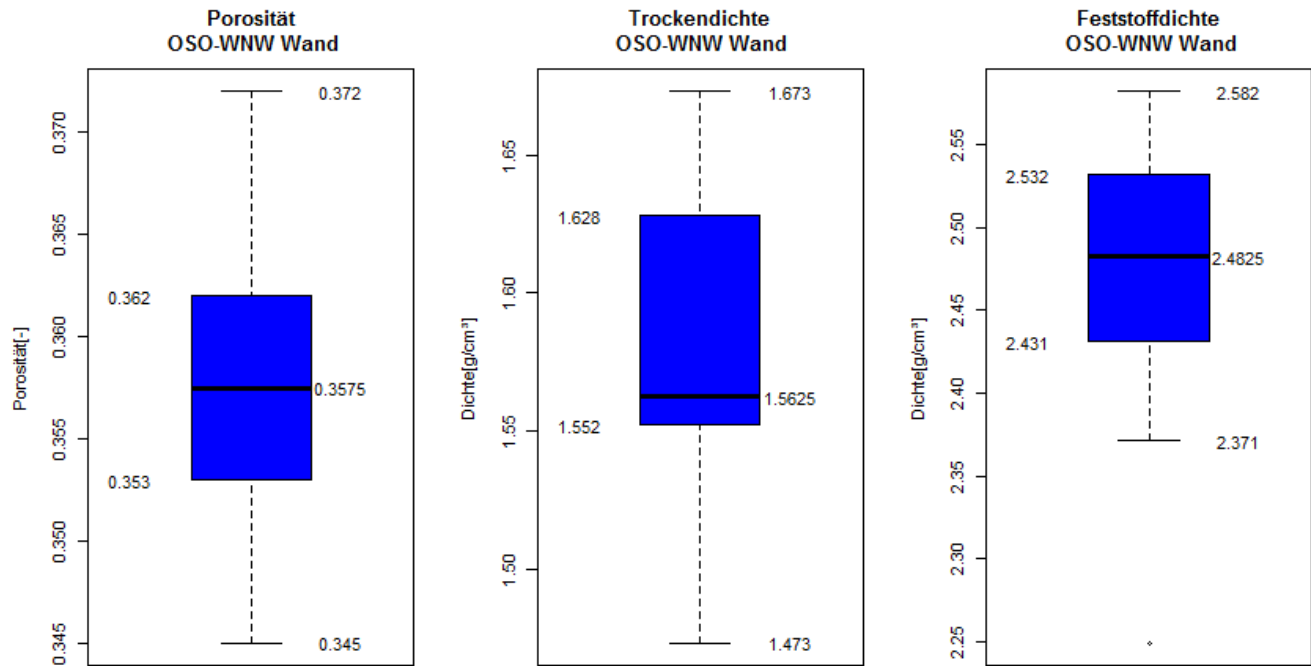


Abb. 26: Auswertung der bodenphysikalischen Parameter der OSO-WNW Wand

### 7.3. Vertikale Durchlässigkeit

Für die vertikale Durchlässigkeit wurden insgesamt 3 Infiltrationsversuche durchgeführt sowie an denselben Stellen Tiny Perm Messungen gemacht und Stechzylinderproben entnommen (siehe Abb. 15). Insgesamt wurden dabei 58 Tiny Perm Messungen, hier aber ohne Netz, durchgeführt und 10 Stechzylinder entnommen. Die Infiltrationsversuche wurden so angeordnet, dass es 1 Messung ohne Störung, 1 Messung mit Störung und 1 Messung mit 2 Störungen durchgeführt wurden um dessen Einfluss herausarbeiten zu können. Die berücksichtigten Störungen haben die Streichrichtungen N-S und NNO-SSW mit einer Mächtigkeit von 1-2cm.

### 7.3.1. Ergebnisse Tiny Perm

Die vertikale Durchlässigkeit ergibt anhand der gesamten Tiny Perm Messungen einen Mittelwert von  $1,91 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  wenn man die Messungen der Störungen dabei außer Acht lässt. Für die Messungen inklusive Störungen eine Durchlässigkeit von  $1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ . Tabelle 6 zeigt die statistische Auswertung der Messung sowohl mit den Werten der Störungen als auch ohne diese. Für die Auswertung auf Normalverteilung wurden die Werte der Störungen herausgenommen. Abb. 27 zeigt die grafische Auswertung und lassen eine Normalverteilung vermuten. Dies kann auch mit dem Shapiro-Wilk Test bestätigt werden (siehe Tabelle 6)

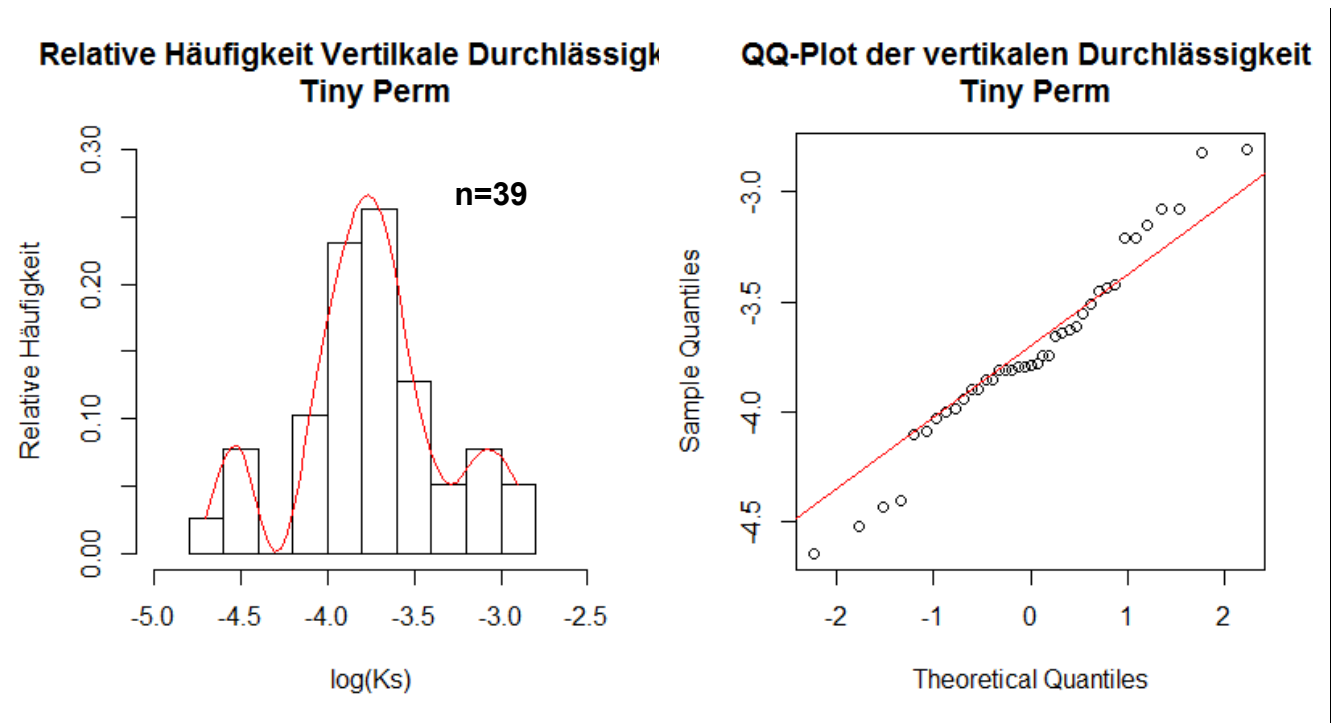


Abb. 27: Verteilung der relativen Häufigkeit und QQ-Plot der der hydr. Durchlässigkeit der Tiny Perm Messungen ohne Störungen. Sowohl Häufigkeitsverteilung als auch QQ-Plot lassen eine Normalverteilung annehmen.

Tabelle 6

Statistische Auswertung der Tiny Perm Messungen Vertikale Durchlässigkeit.

TP = Tiny Perm,  $\sigma$  = Standardabweichung,  $\sigma^2$  = Varianz, IQR = Interquartilrange. Alle Ergebnisse als  $\log(Ks)$  [m/s] angegeben. Shapiro-Wilk Normalverteilungstest bei 95% Konfidenzintervall als p-Werte angegeben

Methode	$\sigma$	$\sigma^2$	Median	Mittelwert	IQR	Shapiro-Wilk
TP mit Störung	$\pm 0.6442$	0.4150	-3.837	-3.940	0.4757	0,0004
TP ohne Störung	$\pm 0.4230$	0.179	-3.785	3.718	0.4386	0,35

Um den Einfluss der Störungen darzustellen wurden die Ergebnisse der Messungen an den 3 Orten der Infiltrometerversuche verglichen (Abb. 28, Links). Das Resultat dieses Vergleichs zeigt deutlich, dass es mit Zunahme der Anzahl an Störungen zu einer Abnahme der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit kommt. Bei Infiltrometerversuch 1 wurden die Messungen ohne eine Störung gemacht und ergaben für die Durchlässigkeit mit einem Mittelwert von  $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  einen geringeren Wert als für die horizontale Durchlässigkeit. Bei den Messungen bei Infiltrometerversuch 2 in dem eine Störung vorhanden war, sank die Durchlässigkeit auf einen Mittelwert von  $9,55 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Bei den Messungen an Infiltrometerversuch 3, an denen 2 sich kreuzende Störungen vorlagen, sank die Durchlässigkeit weiter auf  $6,31 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Somit kann angenommen werden, dass die Störungen einen Einfluss auf die Infiltrationsraten haben.

Die mittlere Durchlässigkeit der einzelnen Störungen beträgt für die Störung mit N-S Streichen  $7,59 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  und für die Störung mit NNO-SSW Streichen  $4,47 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ . Obwohl die Durchlässigkeit der NNO-SSW streichenden Störung um mehr als ein 10faches geringer ist scheint die Auswirkung auf die gesamte durchschnittliche Durchlässigkeit des Bereiches nur einen geringen Einfluss zu haben. Vermutlich ist liegt der Grund dafür im steilen Einfallen der Störungen welches in einem späteren Kapitel noch genauer diskutiert wird.

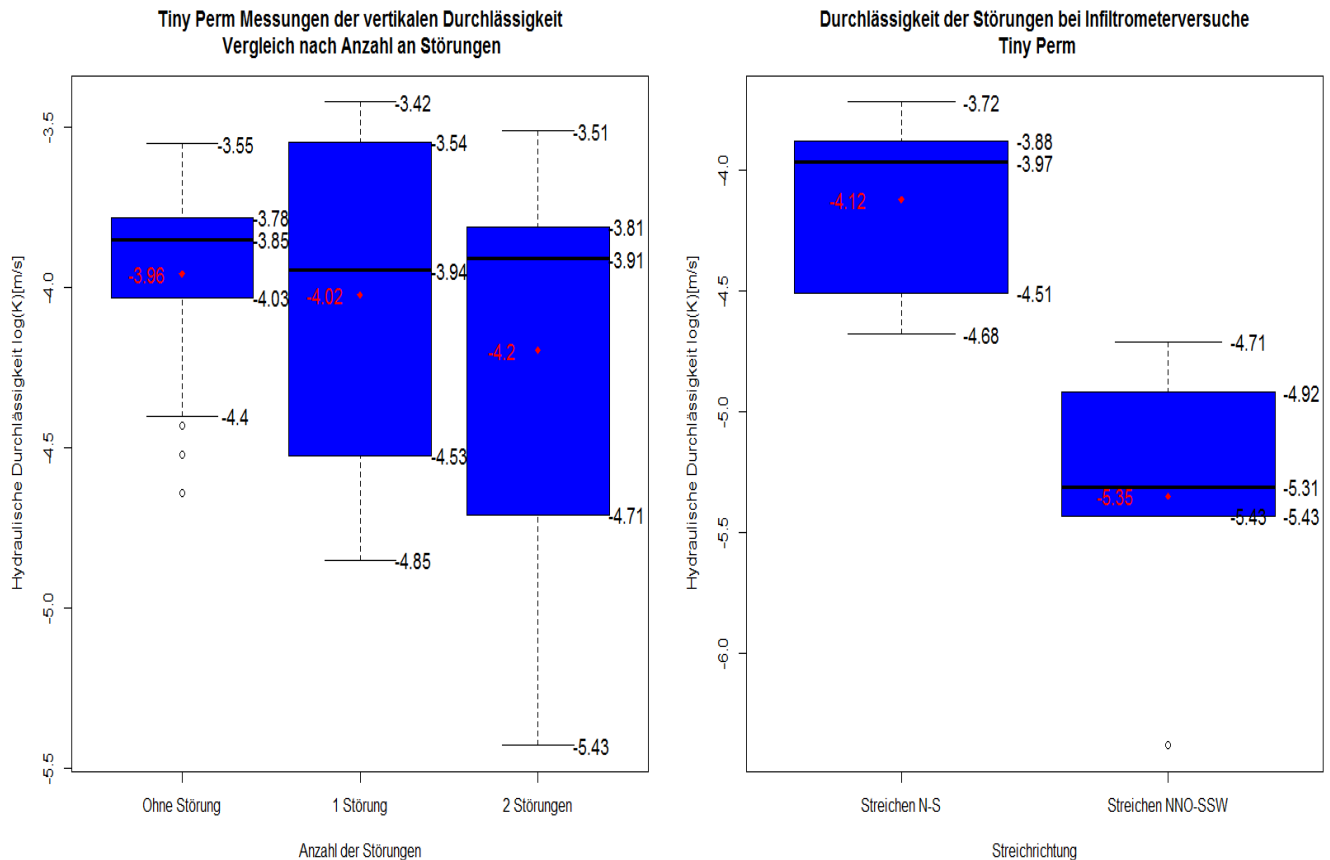


Abb. 28 Links: Vergleich der Durchlässigkeit mit steigender Anzahl der Störungen. (Tiny Perm) Rechts: Durchlässigkeit der Störungen. Schwarze Linie zeigt den Median, Roter Punkt zeigt das arithmetische Mittel

### 7.3.2. Ergebnisse Stechzylinder

Die vertikale Durchlässigkeit, welche mittels Permeameter im Labor ermittelt wurde, beträgt im Mittel  $4,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Die Ergebnisse der aus den Störungen entnommenen Proben wurde bei der statistischen Berechnung auch mitberücksichtigt (Tabelle 7).

Aus den Störungen selbst wurde jeweils eine Probe entnommen und im Labor auf ihre Durchlässigkeit getestet. Für die N-S streichende Störung ergibt sich hier eine Durchlässigkeit von  $1,91 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  und für die NNO-SSW streichende Störung  $1,45 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Auch hier wurde wieder der Einfluss der Störungen auf die Durchlässigkeit herausgearbeitet.

Tabelle 7

Statistische Auswertung der Stechzylinder Vertikale Durchlässigkeit.

TP = Tiny Perm,  $\sigma$  = Standardabweichung,  $\sigma^2$  = Varianz, IQR = Interquartilrange. Alle Ergebnisse als  $\log(Ks)$  [m/s] angegeben. Shapiro-Wilk Normalverteilungstest bei 95% Konfidenzintervall als p-Werte angegeben

<b>Methode</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b>Median</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>IQR</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>
SZ mit Störung	±0.3642	0.1326	-4.210	-4.310	0.6795	0.42
SZ ohne Störung	±0.284	0.081	-4.196	-4.175	0.364	0.563

Auch hier ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Ergebnissen der Tiny Perm Messungen. Allerdings zeigt sich zwischen Infiltrometerversuch 1 (ohne Störung) und Versuch 2 (1 Störung) kein Unterschied in der Durchlässigkeit. Erst bei Infiltrometerversuch 3 (2 Störungen) sinkt die mittlere Durchlässigkeit von  $5,5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  auf  $3,89 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  (Abb. 29).

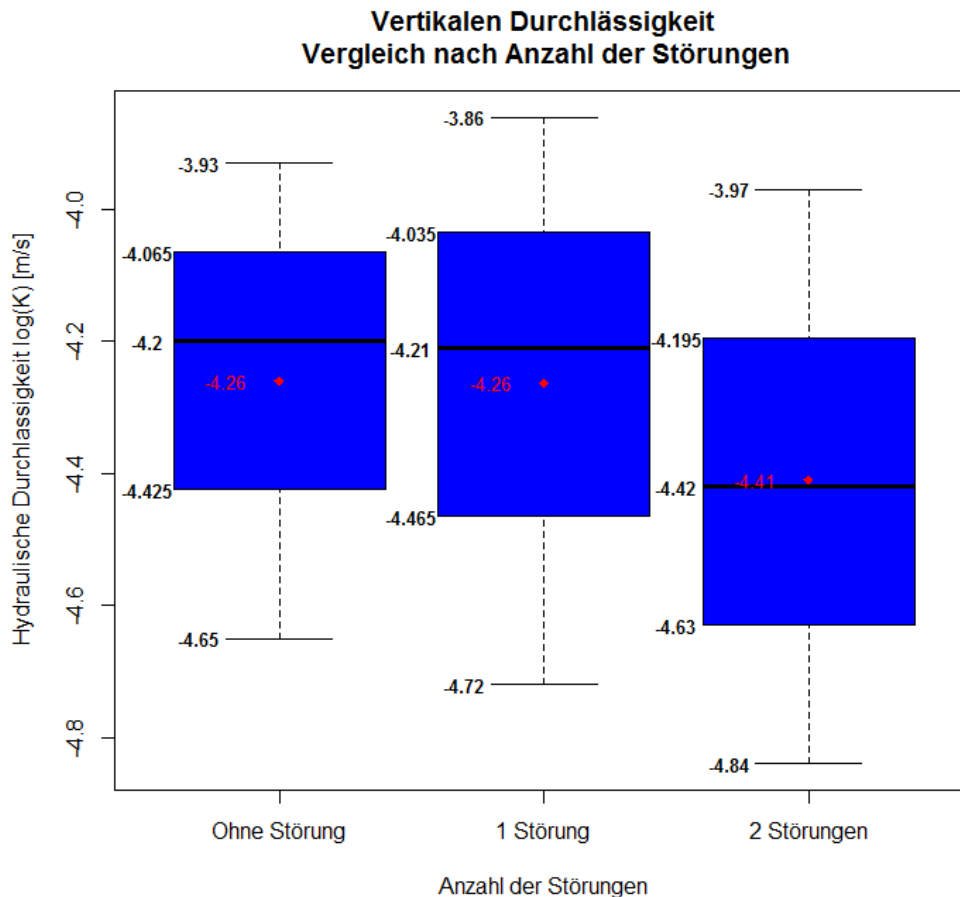


Abb. 29: Vergleich der hydraulischen Durchlässigkeit mit ansteigender Zahl der Störungen (Stechzylinder).  
Schwarze Linie: Median, Roter Punkt: Arithmetisches Mittel

### 7.3.3. Ergebnisse Infiltrometerversuche

Die Infiltrometerversuche wurden an den 3 ausgewählten Standpunkten (siehe Abb.15) mit und ohne Störungen durchgeführt. Aufgrund der starken Niederschläge der Vortage war der Boden stark gesättigt und eine konstante Infiltrationskapazität konnte schon nach etwa 10min erreicht werden. Bei allen 3 Versuchen hielt sich die Infiltrationsrate ab 0,1-0,15mm/s konstant. Vorangegangene Versuche an denselben Standorten aber unter trockenen Bedingungen waren fast unmöglich, da die Infiltrationsraten für die Versuche zu hoch waren. Die berechneten Werte ergaben für die gesättigte Durchlässigkeit der 3 Versuche nur geringe Unterschiede und stimmen mit den Ergebnissen der Tiny Perm Messungen und der Permeameter Ergebnisse gut überein (Tabelle 8). Ein Einfluss der

Störungen konnte allerdings bei den Versuchen nicht festgestellt werden. Die geringste Durchlässigkeit tritt bei Infiltrationsversuch 1 welcher eigentlich die höchste Durchlässigkeit aufweisen sollte da er auf einer Fläche ohne Störungen durchgeführt wurde. Ein Mittelwert aller 3 Versuche ergibt eine gesättigte Durchlässigkeit von  $7,21 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .

Tabelle 8 Ergebnisse der Infiltrationsversuche

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	
<b>Log(<math>K_{fs}</math>)[m/s]</b>	-4,20	-4,05	-4,17	
<b>Methode</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b>Median</b>	<b>Mittelwert</b>
<b>Infiltrationsmeter</b>	$\pm 0.0816$	0.0066	-4.175	-4.142

#### 7.3.4. Bodenphysikalische Parameter

Aus den insgesamt 10 entnommenen Stechzylinderproben wurde die Porosität, Trockendichte sowie Feststoffdichte ermittelt (Abb. 30). Für die Porosität ergibt sich dabei einen Mittelwert von 33,3% (Median 32,5%). Die besonders niedrige Porosität von 30% kann dabei auf die aus Störungen entnommenen Proben zurückgeführt werden und wird in einem späteren Kapitel noch diskutiert.

Bei der Trockendichte liegt sowohl der Mittelwert als auch der Median bei  $1,66 \text{ g/cm}^3$ . Auch hier können die höheren Dichten auf die Proben der Störung oder einer Verdichtung der Sedimente zurückgeführt werden. Die 2 Proben welche aus den Störungen entnommen wurden weisen eine Trockendichte von  $1,75$  und  $1,72 \text{ g/cm}^3$  auf.

Die Feststoffdichte liegt im Mittel bei  $2,49 \text{ g/cm}^3$  (Median  $2,46 \text{ g/cm}^3$ ). Die Proben der Störungen zeigen mit Werten über  $2,6 \text{ g/cm}^3$  eine höhere Dichte als die der anderen Proben auf.

Aufgrund der härteren Beschaffenheit des Materials der Störungen musste jedoch eine Probe verworfen werden, da sich bei den Auswertungen gezeigt hat, dass es sich um keine ungestörte Probe mehr handelt. Durch das Brechen des Störungsmaterials kam es zu einem hydraulischen Kurzschluss sowie zu Materialverlust bei den Messungen.

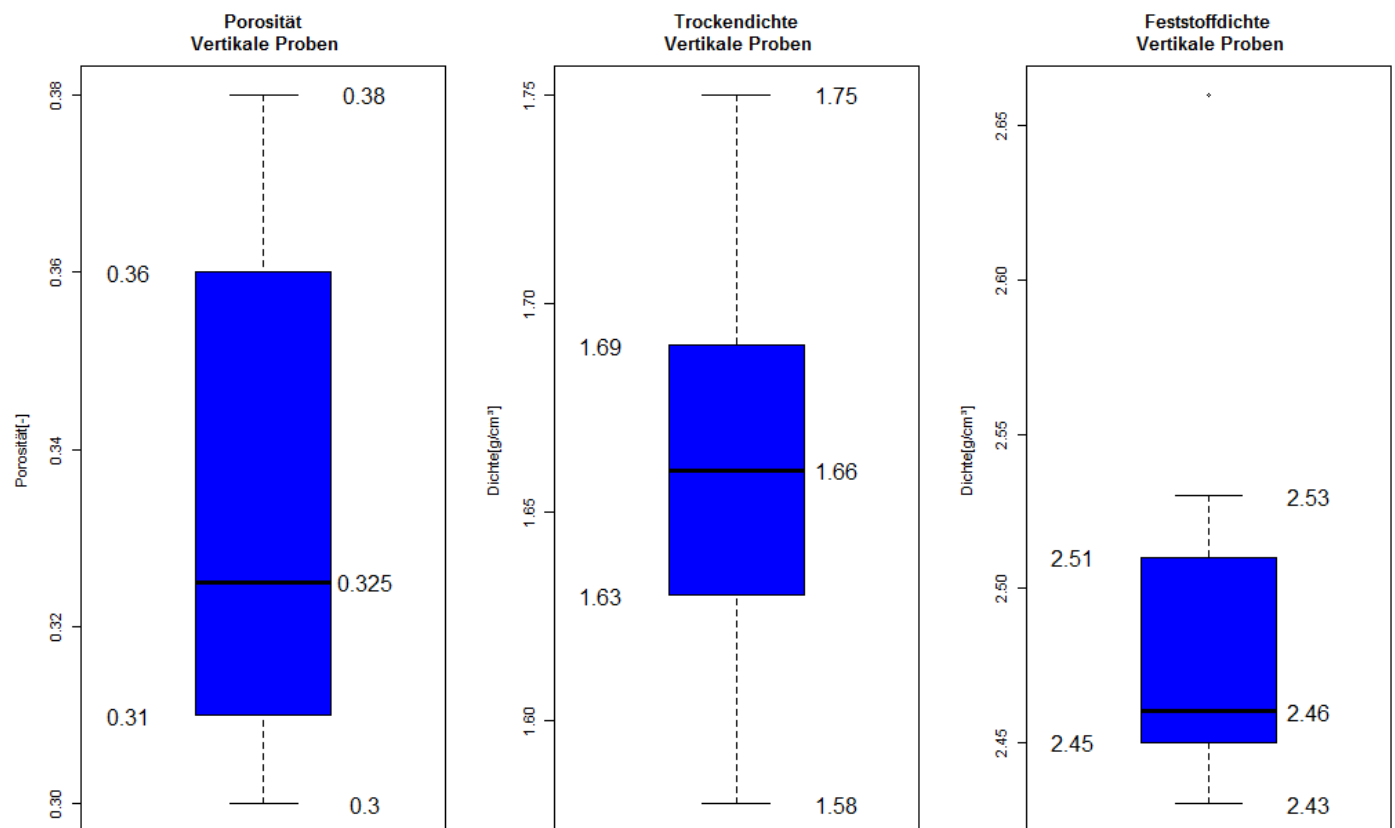


Abb. 30: Bodenphysikalische Parameter der vertikal entnommenen Stechzylinder

## 8. Diskussion

### 8.1. Methodenvergleich

Ein Methodenvergleich zeigt, dass es unter den Methoden zu einigen Unterschieden in der hydraulischen Durchlässigkeit kommt. Abb. 31 stellt diesen Vergleich grafisch dar.

An der SW-NO Wand liegt ein merklicher Unterschied zwischen den Ergebnissen der Tiny Perm Messungen denen der Permeameter Ergebnisse vor. Die mittlere Durchlässigkeit der Tiny Perm Messungen ist mit  $5,75 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  um einiges höher als die der Stechzylinderproben mit  $1,82 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ . Eine Möglichkeit dafür könnte der Einfluss der Störung auf das Gesamtergebnis sein. Obwohl mit 1680 Messungen die Anzahl der Daten viel größer ist, ist die Anzahl der Messungen an der Störung vergleichsweise gering (~2% aller Messungen). Bei den Stechzylindern wurden von insgesamt 8 Proben 2 aus der Störung entnommen was 25% aller Proben ausmacht. Der Einfluss der Störung auf das Gesamtergebnis ist daher viel höher und spiegelt sich in einer geringeren mittleren Durchlässigkeit wieder

An der OSO-WNW Wand spiegelt der Vergleich der Methoden die Homogenität dieses Bereichs wider. Sowohl der Mittelwert der Tiny Perm Messungen als auch der der Permeameterergebnisse zeigen mit einer Durchlässigkeit von  $2,95 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  und  $2,75 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  dieselbe Durchlässigkeit.

Bei der vertikalen Durchlässigkeit zeigt der Vergleich, dass der Mittelwert zwischen Tiny Perm ( $1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ ) und Infiltrometer ( $7,24 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ) ähnlich sind. Das Ergebnis der Stechzylinderproben hingegen zeigt mit einem Mittelwert von  $4,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  eine geringere Durchlässigkeit. Begründung dafür könnte sein, dass Infiltrometer und Tiny Perm die mittlere Durchlässigkeit der ungefähr selben Fläche zeigen, pro Versuch etwa  $0,22 \text{ m}^2$ . Wohingegen die Proben der Stechzylinder, welche nur zufällig angeordnet entnommen wurden, die Durchlässigkeit einer Fläche von nur wenigen  $\text{cm}^2$  pro Probe widerspiegeln.

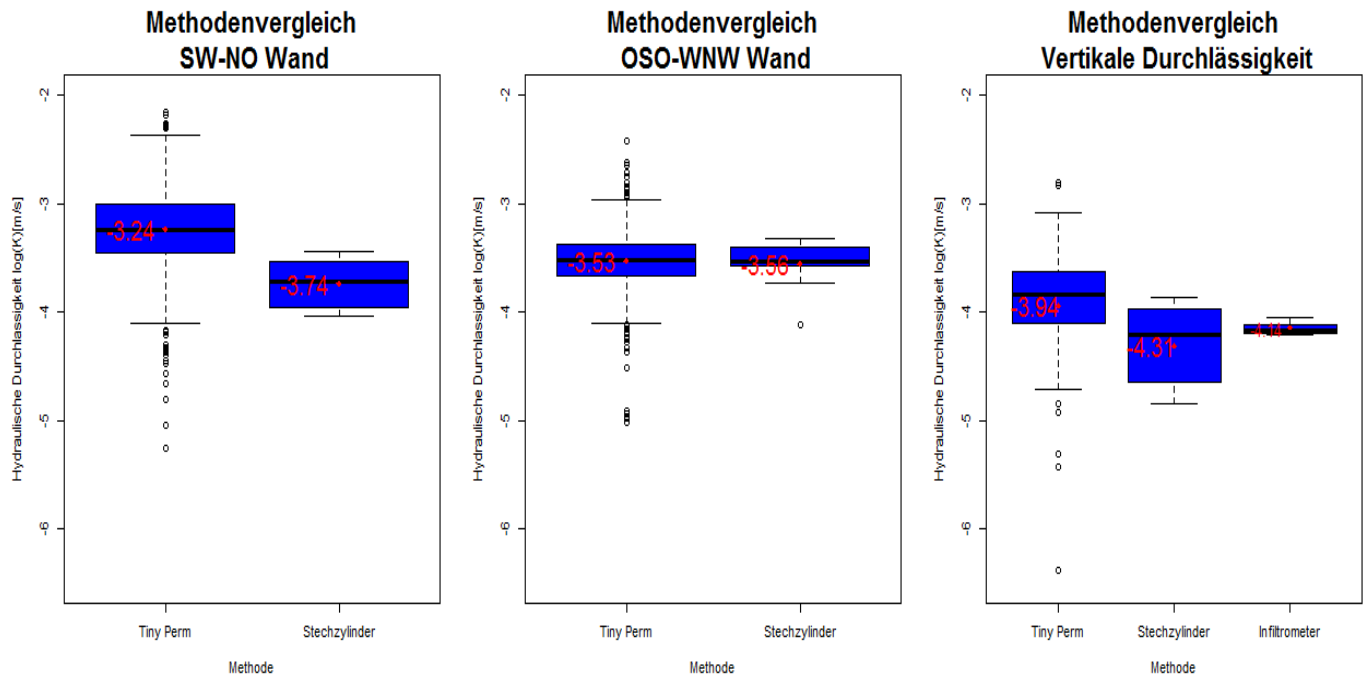


Abb. 31: Vergleich der Methoden und ihre Ergebnisse der hydraulischen Durchlässigkeit. Rote Punkte zeigen den arithmetischen Mittelwert.

## 8.2. Richtungsabhängigkeit der hydr. Durchlässigkeit

Die hydraulische Durchlässigkeit zeigt im Bearbeitungsgebiet eine eindeutige Richtungsabhängigkeit. Abb. 32 zeigt die Durchlässigkeit in die verschiedenen Raumrichtungen aus den Ergebnissen der Tiny Perm Messungen als auch aus den Ergebnissen der Stechzylinderauswertung. Dabei zeigen die Tiny Perm Messungen aber ein anderes Ergebnis als die der Stechzylinder.

Aus den Ergebnissen der Tiny Perm Messungen ergibt sich an der SW-NO Wand, an welcher in Richtung NW gemessen wurde, mit einer Durchlässigkeit von  $5,75 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  der höchsten Wert. An der OSO-WNW Wand, an welcher in Richtung SSW gemessen wurde, ist die Durchlässigkeit mit  $2,95 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  geringer. Am niedrigsten ist die vertikale Durchlässigkeit mit einem Wert von  $1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ .

Das Ergebnis der Stechzylinderauswertung zeigt die höchste Durchlässigkeit an der OSO-WNW Wand mit  $2,75 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  und ist damit ident die der Tiny Perm Messungen. Die Durchlässigkeit der SW-NO Wand ist nach den Permeameterergebnissen mit  $1,82 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  geringer als die der OSO-WNW Wand. Die geringste Durchlässigkeit zeigt auch bei den Stechzylindern die Vertikale Durchlässigkeit mit  $4,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .

Ein Unterschied der vertikalen und horizontalen Durchlässigkeit kann somit bestätigt werden. Ob auch ein Unterschied der Durchlässigkeit in den beiden horizontalen Richtungen vorliegt kann aufgrund der Unterschiedlichen Ergebnisse nicht genau gesagt werden. Ein verlässlicheres Ergebnis scheint aber das der Tiny Perm Messungen zu sein, da aufgrund der hohen Anzahl der Messungen ein vertrauenswürdigeres Ergebnis vorhanden ist. Die Messungen waren auch koordiniert an einem Raster durchgeführt worden, wohingegen die Entnahmestellen der Proben mit Stechzylinder zufällig gewählt wurden und deshalb einen viel kleineren Bereich der Messfläche repräsentieren.

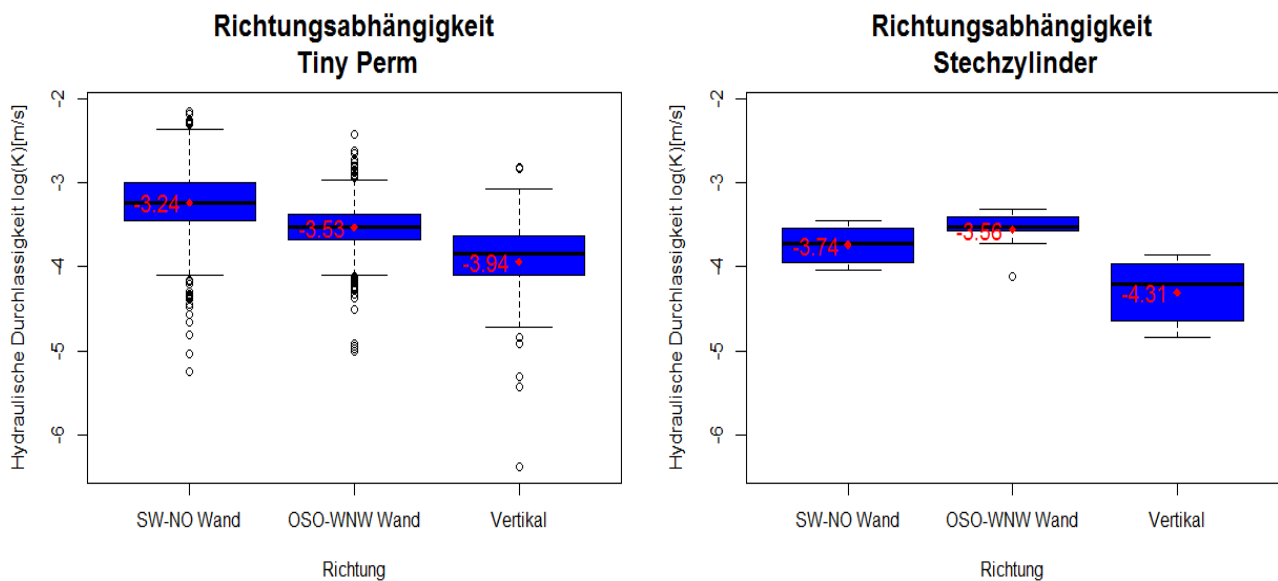


Abb. 32: Richtungsabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit.  
Rote Punkte markieren das arithmetische Mittel. Plots wurden inklusive der Messungen an den Störungen erstellt.

### 8.3. Hydraulische Charakterisierung der Störungen

Im Bearbeitungsgebiet liegt ein System aus Störungen drei unterschiedlicher Orientierungen vor (Abb. 33). Die Störungen erreichen dabei nur eine geringe Mächtigkeit von wenigen Zentimetern. Makroskopisch sind sie durch ein feinkörnigeres Sediment und durch eine Rotfärbung durch Eisenoxidausfällungen deutlich Erkennbar. Besonders nach Niederschlägen zeigen sich die Störungen, da sie aufgrund des feinkörnigeren Materials eine höhere Speicherkapazität haben und die Feuchtigkeit länger halten können als das Umgebende Sediment. Abb. 32 zeigt die Störungen kurz nach einem Niederschlag und sind durch ihren hohen Feuchtigkeitsgehalt deutlich zu erkennen. Am häufigsten treten die Störungen mit der Durchschnittlichen Orientierung 115/71 und 275/73 im Bearbeitungsgebiet auf. Eine weitere Störung mit der Orientierung 332/80 ist nur an 2 Orten im Gebiet zu finden. Sie zeichnet sich aber dadurch aus, dass ihre Mächtigkeit im Dezimeterbereich liegt und das Störungsmaterial viel stärker verfestigt ist. Auch eine stärkere Rotfärbung ist durch die Eisenoxidfällung erkennbar.



Abb. 33: Störungen im Arbeitsgebiet.  
Rote Linien markieren die 2 am häufigsten auftretenden Störungsrichtungen im Gebiet.

### 8.3.1. Orientierung der Störungen

Die im Arbeitsgebiet auftretenden Flächen wurden nach Möglichkeit eingemessen. Aufgrund des nur gering verfestigten Störungsmaterials konnten nur wenige brauchbare Flächen zur Orientierungsmessung aufgefunden werden. Die so erhobenen Daten wurden mit dem Programm Fabric8 stereographisch dargestellt und statistisch ausgewertet. Unter den 30 gemessenen Flächen konnten 3 Hauptorientierungen festgestellt werden (Abb. 34). Dabei wurde eine steil nach SO einfallende Störung (115/71) und eine steil nach Westen einfallende Störung (275/73) herausgearbeitet. Diese beiden Störungen sind auch die am häufigsten auftretenden im Arbeitsgebiet. Eine weitere Störung welche steil nach Nord-Westen einfällt (332/80) wurde nur an 2 Stellen im Arbeitsgebiet gefunden.

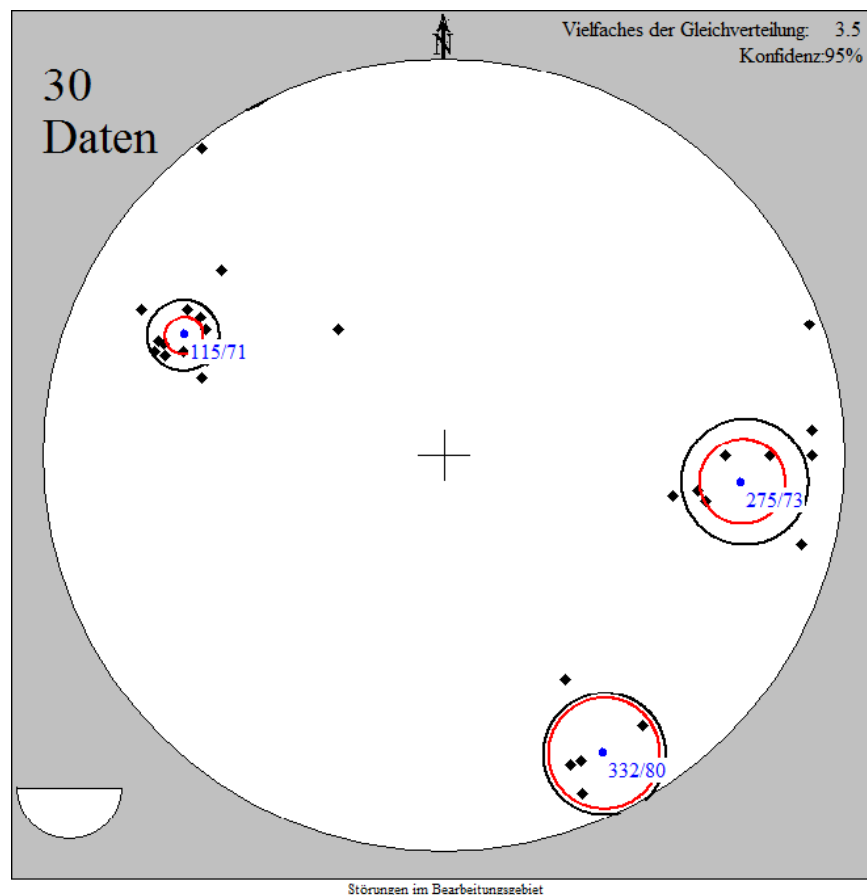


Abb. 34: Stereographische Projektion unterer Halbkugel der Störungsflächen. Flächen sind als Polpunkte dargestellt. Blaue Punkte zeigen die mittlere Orientierung der Störungen. Werte sind als Flächen angegeben.

Ein Vergleich der Streichrichtungen der Störungen mit dem allgemeinen Störungslinament des Oststeirischen Beckens zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Lineamente des Beckens zeigen 2 Hauptorientierungen.

1. NNO–SSW bis NO – SW
2. NW – SO bis W – O

Ein Vergleich des im NANUTIWA Bericht (Domberger et al. 2005) ausgearbeitet Fotolinament des steirischen Beckens zeigt, dass die Streichrichtungen mit denen des Arbeitsgebietes übereinstimmen. Allerdings treten vor Ort nur Störungen mit einem Streichen von NNO – SSW bis NO – SW auf, die Störungen mit einem NW – SO Streichen sind nicht vorzufinden. Nach Domberger et al. (2005) entstanden die NW –SO Störungen zu einem sehr frühen Stadium der Beckenentwicklung. Vermutlich wurden die Sedimente des Arbeitsgebietes erst nach der Hauptaktivität dieser Störungen abgelagert und sind deshalb nicht vorzufinden.

Da das oberflächliche Auftreten von Störungen in tertiären Sedimenten des Oststeirischen Beckens eher die Ausnahme bildet, wäre eine genaue Aufnahme des Störungssystems wünschenswert. In dieser Arbeit liegt der Fokus nicht auf der Tektonik des steirischen Beckens, weshalb auf eine genaue Ausarbeitung dieses Themas verzichtet wurde.

### 8.3.2. Hydraulische Durchlässigkeit der Störungen

An den verschiedenen Störungen wurde versucht mittels Tiny Perm Messungen und Entnahme von Stechzylinderproben die hydraulische Durchlässigkeit zu ermitteln. Dabei wurde versucht Messungen parallel und vertikal zu den Störungen durchzuführen (Abb 35). Die Beprobung in parallele Richtung erwies sich jedoch als schwer durchführbar, da aufgrund der geringen Festigkeit des Störungsmaterial eine

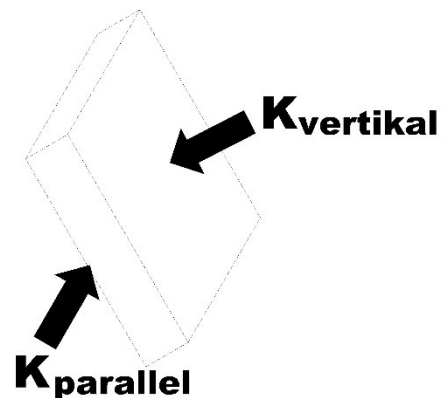


Abb. 35: Schematische Skizze der Messrichtungen an den Störungen.

$K_{parallel}$  = Durchlässigkeit parallel zur Störungsfläche,  
 $K_{vertikal}$  = vertikal auf die Störungsfläche

Messung durch Tiny Perm oder die Entnahme von Stechzylindern nur an wenigen Stellen möglich war ohne das Material zu zerstören (siehe Abb.36).



Abb. 36: Entnahme einer Stechzylinderprobe parallel zur Störung 332/80

Die Ergebnisse der Tiny Perm Messungen zeigen eine Unterschiedliche Durchlässigkeit der drei Störungsrichtungen. Auch die Durchlässigkeit welche vertikal und auch parallel zu den Störungen gemessen wurden, unterscheiden sich (Abb. 37). Wie schon vermutet tritt bei der Störung 332/80 welche die höchste Mächtigkeit aufweist und auch am stärksten verfestigt ist die geringste mittlere vertikale Durchlässigkeit mit einem Wert von  $8,13 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  auf. Die Störung 115/71 weist mit einem Wert von  $3,02 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  eine etwas höhere mittlere Durchlässigkeit auf. Mit  $1,32 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  ist die Durchlässigkeit der Störung 275/73 am höchsten.

Bei allen drei Störungen ist zu beobachten, dass die Durchlässigkeit parallel zur Störung höher ist als die der vertikalen. Auch hier weist die Störung 275/73 wieder die höchste mittlere Durchlässigkeit auf ( $4,68 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ), die beiden anderen Störungen hingegen weisen mit  $\sim 7,94 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  kaum einen Unterschied auf. Diese Ergebnisse bestätigen auch die Messungen der Störungen an der SW-NO Wand und den Störungen der Infiltrationsversuche. Die Messungen dort ergaben für die Störung 115/71 einen

Mittelwert für die Durchlässigkeit von  $7,76 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  und für die Störung 275/33 einen Wert von  $6,31 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .

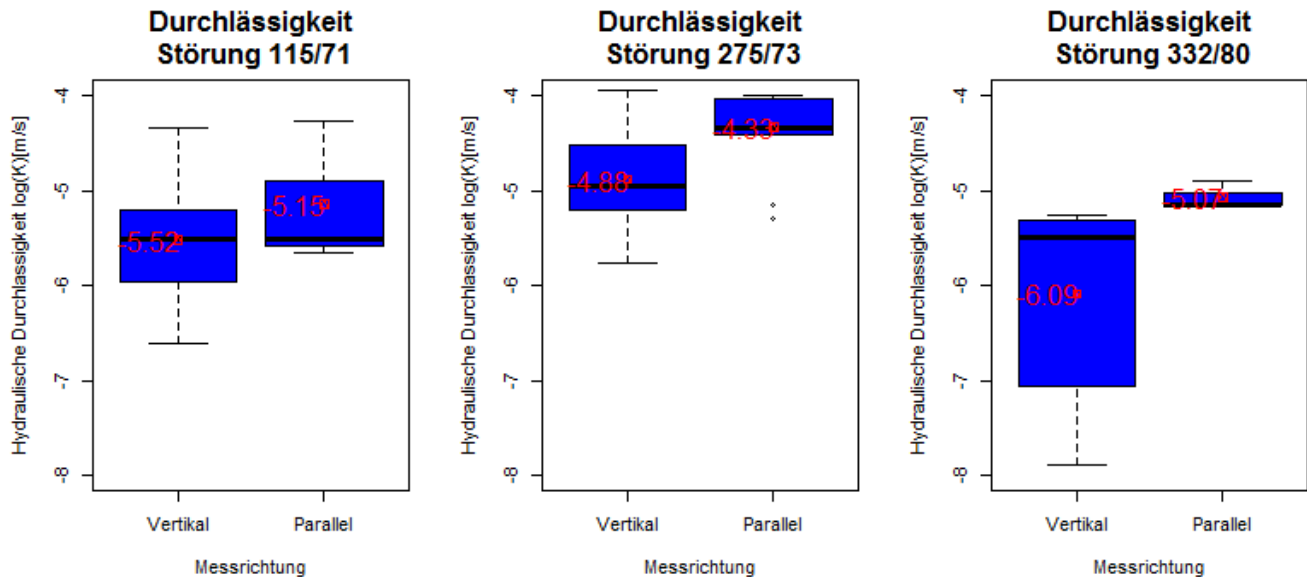


Abb. 37: Durchlässigkeit der drei Störungen, vertikal und parallel dazu.  
Rote Werte geben das arithmetische Mittel.

Die Ergebnisse der Stechzylinderproben weichen, wie in Tabelle 9 zu sehen ist, bis auf die Proben der Störung 275/73 stark von denen der Stechzylinder ab. Grund dafür, ist das durch die Beschaffenheit des Störungsmaterials eine ungestörte Probennahme kaum garantiert werden kann. Ein Zerschneiden des Materials und eine damit einhergehende stärkere Durchlässigkeit kann nicht ausgeschlossen werden. Des Weiteren kann aufgrund der geringen Mächtigkeit der Störungen die horizontale Durchlässigkeit nicht erfasst werden, da das umgebende Material das Ergebnis stark beeinflusst. Die Ergebnisse zeigen trotzdem einen geringeren Wert als der des umliegenden Materials.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Stechzylinder und Tiny Perm zeigt, dass für die Störung 115/71 und 332/80 die Durchlässigkeit der Stechzylinder zu hoch ausfällt. Lediglich für die Störung 275/73 stimmt das Ergebnis mit dem der Durchlässigkeit parallel zur Störung mit den Tiny Perm Messungen überein. Für eine weitere Bearbeitung sollten daher die Ergebnisse der Stechzylinder vernachlässigt werden und die der Tiny Perm Messungen aufgrund ihrer höheren Vertrauenswürdigkeit herangezogen werden.

Tabelle 9 Ergebnisse der Durchlässigkeit aus den Störungen.  
 Werte sind in  $\log(Ks)[m/s]$  angegeben. Störung 332/80 für SZ zeigt nur horizontale Durchlässigkeit.  
 TP = Tiny Perm, SZ = Stechzylinder

Störung	Probenanzahl SZ	Probenanzahl TP Vertikal/Parallel	Arithm Mittel SZ	Arithm Mittel TP Vertikal/Parallel
115/71	2	23/3	-3,96	-5,52/-5,15
275/73	5	24/9	-4,25	-4,88/-4,33
332/80	1	6/3	-4,10	-6,09/-5,07

### 8.3.3. Bodenphysikalische Parameter der Störungen

Die Auswertung der Stechzylinderproben auf ihre bodenphysikalischen Eigenschaften (Abb. 38), im Vergleich zu den anderen Bearbeitungsbereichen, zeigen eine höhere Trocken- als auch Feststoffdichte. Die Porosität hingegen unterscheidet sich zu den anderen Proben kaum.

Ein direkter Vergleich (Tabelle 10) zeigt, dass sich die Porosität im Mittel an allen Probenorten mit 34-37% kaum unterscheidet. Sowohl die Trockendichte als auch die Feststoffdichte zeigt einen Unterschied zu den horizontal entnommenen Proben aus der SW-NO Wand und der OSO-WNW Wand. Im Vergleich zu den vertikal entnommenen Proben an den Infiltrimeter ergibt sich jedoch kein Unterschied in der Trockendichte, lediglich die Feststoffdichte zeigt einen höheren Wert.

Tabelle 10 Vergleich der Ergebnisse der bodenphysikalischen Parameter. Angegeben als Median und arithmetischer Mittelwert. Einheit der Dichte  $[g/cm^3]$

Probenort	Porosität (Median/Arithm. Mittel)	Trockendichte (Median/Arithm. Mittel)	Feststoffdichte (Median/Arithm. Mittel)
SW-NO Wand	0,34/0,34	1,59/1,60	2,41/2,42
OSO-WNW Wand	0,36/0,36	1,56/1,58	2,48/2,46
Infiltrimeter	0,37/0,36	1,66/1,66	2,46/2,49
Störungen	0,37/0,36	1,65/1,65	2,55/2,57

Dass es zwischen den Proben welche an den Infiltrimeter entnommen wurden und den Proben der Störungen keinen Unterschied gibt, kann dadurch begründet werden, dass es durch die Arbeiten mit schweren Gerät in der Sandgrube, zur Verdichtung des Materials nahe der Oberfläche gekommen ist. Obwohl vor der Beprobung 20cm der Oberfläche

entfernt wurden, scheint diese Verdichtung noch immer einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse zu haben.

Diese Verdichtung könnte die Ergebnisse aller drei Methoden beeinflusst haben, wodurch es zu einer Unterschätzung der vertikalen gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit kommt. Dies kann durch den Vergleich der Trockendichten in Tabelle 10 bestätigt werden. Die Trockendichte des unbeeinflussten Materials liegt wie an den horizontal entnommenen Proben bei  $\sim 1,6\text{g/cm}^3$  und müsste somit auch an den vertikal entnommenen Proben in diesem Bereich liegen.

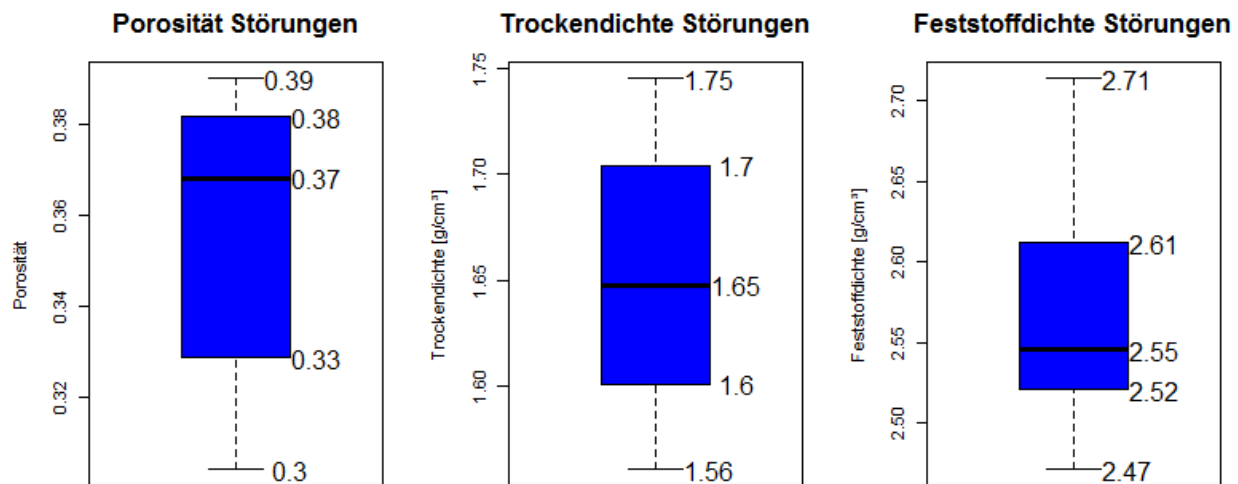


Abb. 38: Auswertung der Stechzylinderproben aus den Störungen auf ihre bodenphysikalischen Eigenschaften

## 8.4. Interaktion zwischen Porosität, Trockendichte und hydr. Durchlässigkeit

Die drei bodenphysikalischen Parameter Porosität, Trockendichte und hydraulische Durchlässigkeit sind Kenngrößen die miteinander stark verbunden sind. Anhand der aus den Stechzylinderproben erhaltenen Ergebnisse wird dieses Zusammenspiel in Abb. 39 veranschaulicht. Die Durchlässigkeit eines Materials ist neben anderen Parametern wie der Korngröße auch stark abhängig von seiner Trockendichte und Porosität. Abb. 39a zeigt, dass ein Anstieg der Gesamtporosität die hydraulische Durchlässigkeit erhöht. Genau gegenläufig dazu verhält sich die Durchlässigkeit zur Trockendichte. Eine Zunahme der Dichte führt zu einer Abnahme der Durchlässigkeit (Abb. 39b). Erklärt werden kann dieses Verhalten durch Abb. 39c. Eine Abnahme der Trockendichte führt zu einer Abnahme der Porosität, folglich muss sich auch die hydraulische Durchlässigkeit eines Materials verringern, wenn dieses komprimiert wird. Beispiel dafür, ist in dieser Arbeit die vermutlich zu gering geschätzte vertikale Durchlässigkeit durch das verdichtete Material nahe der Oberfläche und die die Abnahme der Porosität durch Beanspruchung bei Störungen.

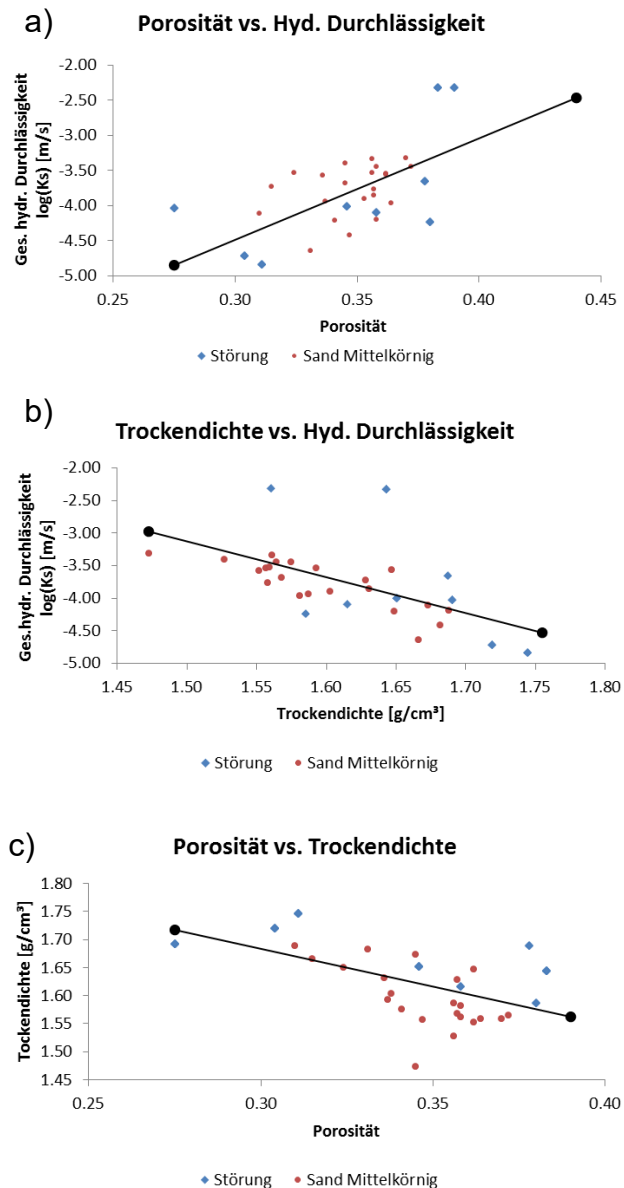


Abb. 39: Interaktion zwischen Porosität, Trockendichte und hydraulischer Durchlässigkeit.

## 8.5. Die Skalenabhängigkeit

Eine Analyse der Messergebnisse auf eine Skalenabhängigkeit hat ergeben, dass im Bearbeitungsgebiet diese, so wie sie von Schulze-Makuch et al. entdeckt wurde, nicht nachgewiesen werden kann. Dabei wurde das geometrische Mittel der drei Methoden herangezogen welche zur Bestimmung der vertikalen Durchlässigkeit verwendet wurden. Abb. 40 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 schon in Kapitel 3. (Die Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit) Schulze-Makuch et al. erwähnen, tritt in einem homogenen Medium dieser Effekt nicht auf. Da es sich im Untersuchungsgebiet überwiegend um homogenen mittelkörnigen Quarzsand handelt tritt dieser Effekt auch hier nicht auf. Anscheinend ist durch das sehr homogene Material ein repräsentatives Elementarvolumen schon auf sehr kleiner Skala erreicht.

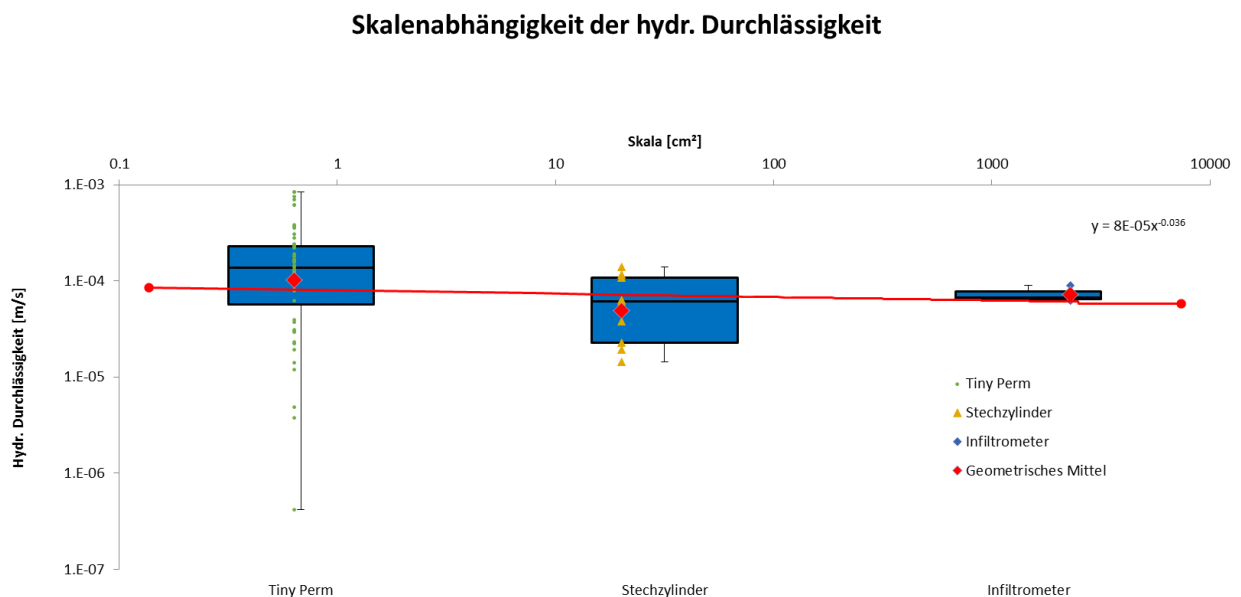


Abb. 40: Skalenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit.

Auch in den anderen Messbereichen in denen ein Vergleich von Tiny Perm und Stechzylinder gemacht wurde (siehe Kapitel 8.1) folgen Skala und Durchlässigkeit nicht dem von Schulze-Makusch postulierten Scale-Law. Allgemein zeigen die Ergebnisse mehr einen umgekehrten Trend, in dem es mit steigender Skala zu einer Abnahme der Durchlässigkeit kommt (siehe Abb 31). Nur an der OSO-WNW Wand haben Stechzylinder und Tiny Perm dieselbe Durchlässigkeit. Ob diese 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 darin, 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 zu 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 Wand und bei Infiltrometerversuch 1 gemacht wurden, in denen keine Störungen miteinbezogen wurden, zeigen, unabhängig von der Methode, dasselbe Messergebnis. In Infiltrometerversuch 2 und 3 sowie an der SW-NO 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 die Potenz  $(b/D)=m$  des Scale Law nicht zwingend einen positiven Wert annehmen muss. Um dies zu bestätigen wären jedoch weitere Untersuchungen auf mehreren Skalen notwendig.

## 8.6. Die Heterogenität der hydraulischen Durchlässigkeit (Kriging)

### 8.6.1. SW-NO Wand

Das Variogrammmodell (Abb.41) zeigt, dass der Nugget Effekt mit 0,0811 sehr hoch ist. Das dieser hohe Wert hauptsächlich durch Messfehler entsteht kann ausgeschlossen werde. Vermutlich kann das Nugget durch eine starke Mikrovariabilität der Durchlässigkeit erklärt werden. Die Messpunkte sind über eine Range von 23,28cm sehr gut korrelierbar

Eine Überprüfung der Richtungsabhängigkeit der Semivarianz ergab, dass sowohl Range als auch Sill in verschiedenen Richtungen nur sehr geringfügig abweichen. Eine Abhängigkeit der Durchlässigkeit von geologischen Gegebenheiten wie einer Schichtung kann daher ausgeschlossen werden.

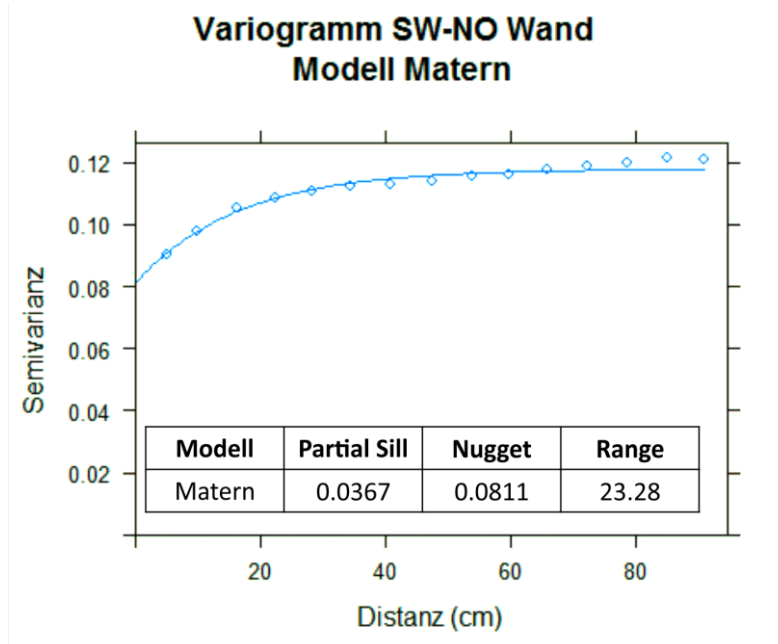


Abb. 41: Variogramm der Tiny Perm Messungen der SW-NO Wand

Die graphische Darstellung der räumlichen Variabilität zeigt im Vergleich zum Messbereich (Abb. 42), dass die geringe Durchlässigkeit der Störung durch das Kriging zu Vorschein kommt. Dennoch ist die Störung deutlich sichtbar. Des Weiteren ist zu erkennen, dass im Messbereich kleinräumige Zonen höherer Durchlässigkeit (gelbe Bereiche: von  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  bis  $10^{-3} \text{ m/s}$ ) und Zonen geringerer Durchlässigkeit (violette Bereiche: von  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  bis  $10^{-4} \text{ m/s}$ ) 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.

Die im Aufschluss erkennbaren rötlichen horizontalen Linien an denen es zur Ausfällung von Eisenoxid kam, repräsentieren ehemalige Grundwasserstände. Das Entstehen dieser Oxidationsausfällungen durch präferierten Wasserfluss in diesen Zonen kann ausgeschlossen werden da diese Bereiche weder einen besonders geringen noch einen besonders hohen Wert für die Durchlässigkeit zeigen.

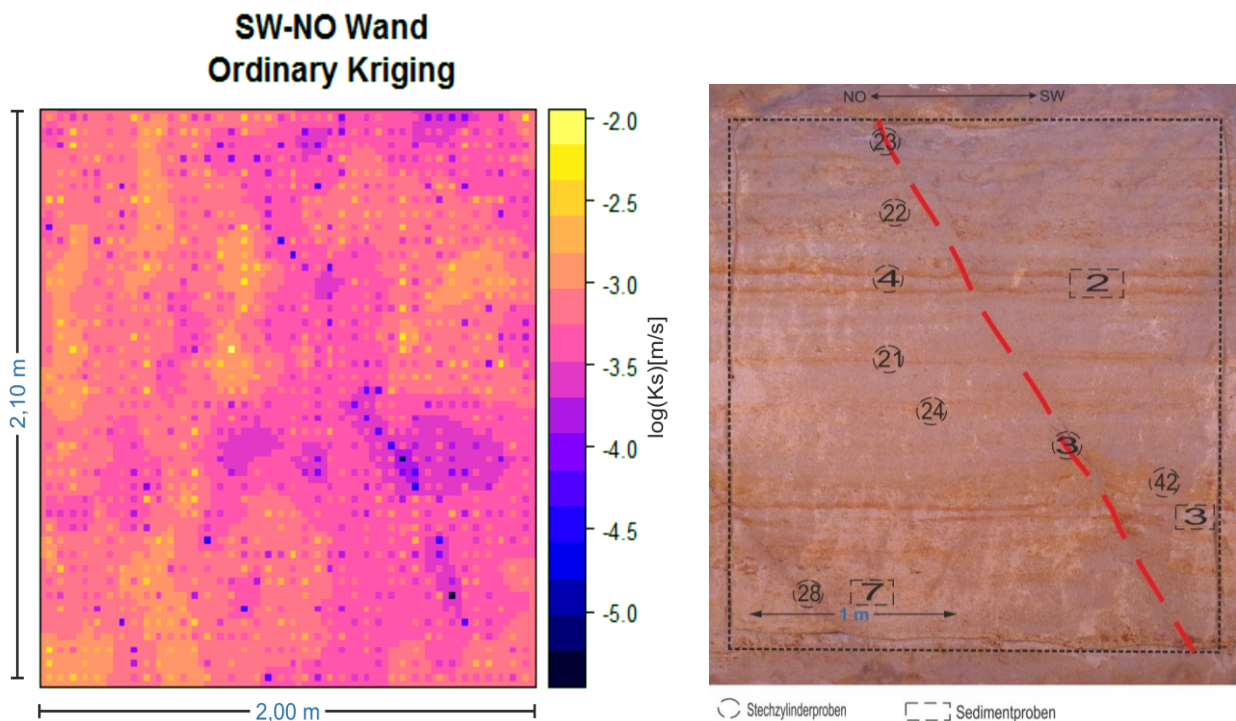


Abb. 42: Kriging Ergebnis der hydraulischen Durchlässigkeit der SW-NO. Rechts Abbildung des Messbereichs der SW-NO Wand als Vergleich

## 8.6.2. OSO-WNW Wand

Das Variogrammmodell der OSO-WNW Wand (Abb. 43) zeigt im Vergleich zur SW-NO Wand einen etwas kleineren Nugget Effekt. Dennoch ist der Wert von 0.037 relativ hoch und zeigt ein hohes Hintergrundrauschen. Auch hier können starke Messfehler ausgeschlossen werden und die Mikrovariabilität dafür verantwortlich gemacht werden. Die Range von 6,537 cm ist hier sehr gering und zeigt, dass zwischen den Messpunkten kaum ein räumlicher Zusammenhang vorliegt.

Da besonders in diesem Messbereich durch die offensichtliche Bankung eine Richtungsabhängigkeit der Semivarianz angenommen wurde, ist auch eine Überprüfung dieser vorgenommen worden. Jedoch zeigte sich auch hier, dass sich das Variogrammmodell in andere Richtungen kaum einen Unterschied zeigt. Somit kann angenommen werden, dass diese Bankung keinen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit hat.

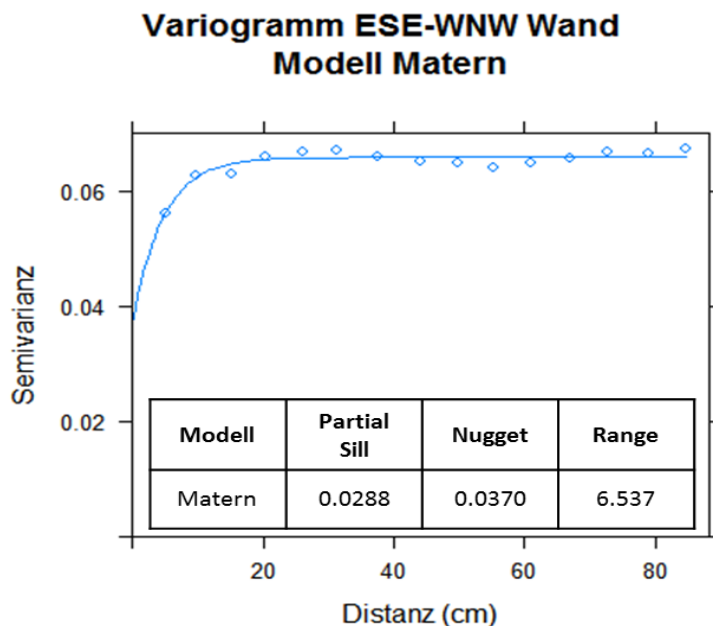


Abb. 43: Variogramm der Tiny Perm Messungen der OSO-WNW Wand

Die flächige Variabilität (Abb. 44) zeigt, dass die Durchlässigkeit der OSO-WNW Wand im Vergleich zur SW-NO Wand über den gesamten Bereich im Mittel eine geringere Durchlässigkeit aufweist. Die Bankung welche im Aufschluss ersichtlich ist kann in der grafischen Darstellung der Durchlässigkeit nicht erkannt werden. Wodurch diese Bankung entsteht kann ohne weitere Analysen der Sedimentproben nicht gesagt werden. Ein besonders gering durchlässigerer Bereich scheint in der unteren linken Hälfte und im obersten mittleren Abschnitt des Messbereiches beobachtet werden. Für die linke untere Hälfte kann optische keine Ursache für die geringere Durchlässigkeit festgestellt werden. Die geringe Durchlässigkeit im oberen Bereich könnte die Ursache in einer veränderten Kornverteilung liegen. Der Vergleich von Kriging und Abbildung des Messbereichs (Abb. 42) zeigt, dass dieser Bereich farblich von den anderen Sedimenten des Messbereichs unterscheidet. Vermutlich wird dieser farbliche Unterschied durch einen größeren Anteil von feinkörnigem Material verursacht.

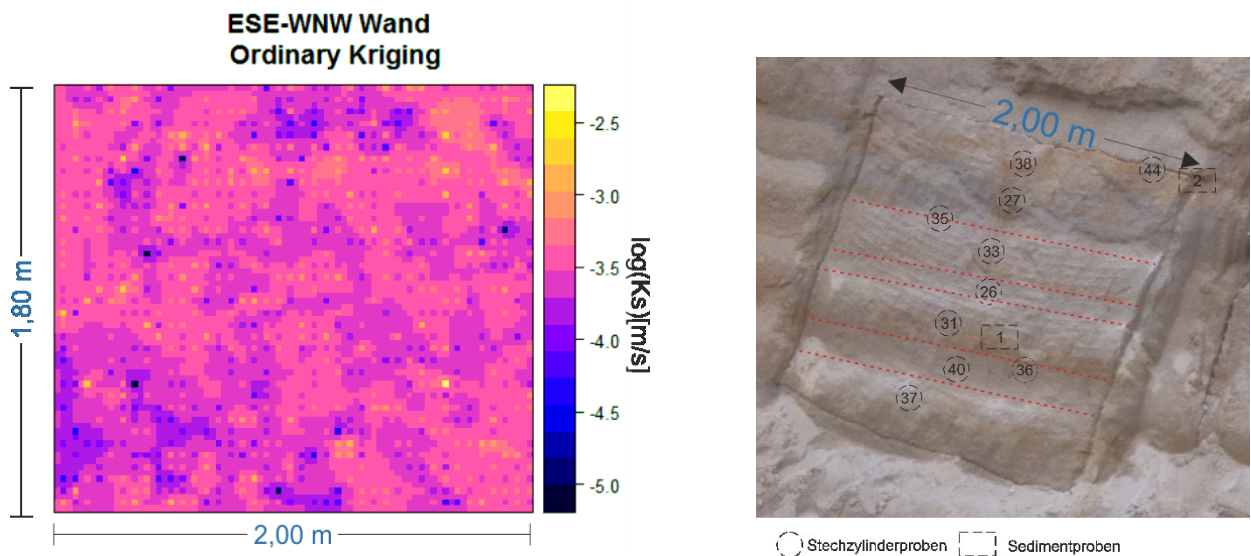


Abb. 44: Kriging Ergebnis der hydraulischen Durchlässigkeit der SW-NO. Rechts Abbildung des Messbereichs der SW-NO Wand als Vergleich

## 9. Interpretation und Ausblick

### 9.1. Zur hydraulischen Charakterisierung

Die Ergebnisse der Messungen zur gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit ergeben, dass die Sande des Baden eine hoch durchlässige Zone der tertiären Sedimente des steirischen Beckens darstellen. Damit sind sie als Infiltrationszonen für die seichten Grundwässer des nahen Gebietes und für die Tiefengrundwässer des gesamten oststeirischen Beckens von hoher Bedeutung.

Zusammenfassend kann durch die Messergebnisse eine starke Richtungsabhängigkeit der Durchlässigkeit festgestellt werden. Im Mittel ist die horizontale Durchlässigkeit in Richtung NW-SO mit  $5,75 \cdot 10^{-4} m/s$  am höchsten. Dies steht vermutlich damit in Verbindung, dass auch die Schüttung dieser Sedimente im Badenium in dieser Richtung erfolgten (vgl. Abb. 11). Das Ergebnis in Richtung SSW-NNO liegt hingegen bei  $2,95 \cdot 10^{-4} m/s$ . Für die vertikale Durchlässigkeit wurde die geringste Durchlässigkeit mit  $1,15 \cdot 10^{-4} m/s$  festgestellt. Da dieser Wert durch die Verdichtung der oberflächennahen Sedimente durch Arbeiten mit schwerem Gerät in der Sandgrube vermutlich als zu gering eingeschätzt wird, kann für die vertikale Durchlässigkeit kein vertrauenswürdiges Ergebnis angenommen werden.

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 Infiltrometersversuche konnte kein Effekt der Störungen auf die Infiltrationskapazität nachgewiesen werden. Vermutlich haben diese durch ihr steiles Einfallen keinen Einfluss auf dieser Messskala. 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 und Infiltration darstellen.

## 9.2. Zum Methodenvergleich

Ein Vergleich der gewählten Methoden hat gezeigt, dass verschiedene Messverfahren zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Dabei stellte sich heraus, dass die Tiny Perm Messungen sowohl vertikal als auch horizontal die höchsten Werte für die mittlere Durchlässigkeit ergeben. Die Ergebnisse der Stechzylinderbewertungen ergeben stets eine geringere Durchlässigkeit, aber auch eine geringere Streuung der Messergebnisse. Dieser Trend zeigt sich auch in den Messungen der vertikalen Durchlässigkeit, außerdem konnte hier auch ein direkter Vergleich mit den Infiltrationsversuchen gemacht werden. Diese zeigen auch eine geringere Durchlässigkeit als die der Tiny Perm Messungen. Mit jenen der Stechzylinder unterscheidet es sich jedoch kaum.

Zum einen könnten diese Unterschiede an der Methode selbst liegen und die Durchlässigkeit, welche man mittels Tiny Perm erhält, wird überschätzt. Wahrscheinlicher ist aber, dass der Unterschied von der Probennahme Strategie abhängt. Da das Material im Arbeitsgebiet sehr homogen erscheint wurden die Stechzylinderproben, bis auf diejenigen der Störung, an zufällig ausgewählten Bereichen entnommen und so eventuell stark durchlässige Zonen nicht mitberücksichtigt. Mittels Tiny Perm hingegen kann eine hohe Anzahl an Daten strategische durch ein Raster generiert werden. Auf diese Weise werden auch Bereiche hoher Durchlässigkeit nicht zufällig ausgespart. Des Weiteren hat durch die hohe Anzahl an Messungen eine kleinräumige Inhomogenität nicht so eine große Auswirkung auf das Mittel der Gesamtmessung.

Daher wäre es empfehlenswert vor der Entnahme der Stechzylinder eine Auswertung der Tiny Perm Messungen zu machen. Aus den im Feld generierten Zahlen welche aus den Messungen hervorgehen können bei so homogenen Material Inhomogenitäten nicht sofort ausgemacht werden. Erst nach Umrechnung in Darcy oder den Durchlässigkeitsbeiwert und deren Visualisierung deren sollte eine Probennahme Strategie für die Entnahme der Stechzylinderproben bestimmt werden.

### 9.3. Zur Heterogenität

Die sehr homogen aufgebauten Sedimente des Arbeitsgebietes lassen annehmen, dass auch die Durchlässigkeit kaum variiert. Das Ergebnis des Kriging zeigt aber, dass es auch in einem so homogenen Material zu einer kleinräumigen Variabilität in der Durchlässigkeit kommt. In beiden Aufschlüssen lassen sich Bereiche mit schlechterer und besserer hydraulischen Durchlässigkeit ausmachen. Diese Bereiche können sich, obwohl sie sich optisch nicht unterscheiden lassen, stark in ihrer Durchlässigkeit variieren (siehe Abb. 42, Abb. 42). In der SW-NO Wand können Bereiche ausgemacht werden in denen die Durchlässigkeit um die  $10^{-3} m/s$ . Diese Bereiche bilden Linsen und unterscheiden sich vermutlich auch in ihrer Kornverteilung. Um dies zu bestätigen müssten allerdings noch weitere Analysen an den Sedimentproben durchgeführt werden.

Die geringe Durchlässigkeit der Störung ist Abb. 42 nur teilweise zu erkennen. Dies liegt zum einem daran, dass durch das aufgelegte Raster die Störung durch ihre Geringmächtigkeit nicht immer erfasst wurde und zum anderen an der geringen Anzahl der Messungen an der Störung im Vergleich zur Gesamtzahl. Dennoch kann diese in Grafik als gering durchlässige Zone erkannt werden.

An der OSO-WNW Wand verhält es sich ähnlich. Auch hier zeichnen sich kleinräumige Heterogenitäten in Form von Linsen aus in denen sich die Durchlässigkeit stark vom Rest unterscheidet. Die anscheinende Bankung welche im Messbereich zu sehen war hat aber offensichtlich keine Auswirkungen auf die Durchlässigkeit.

#### 9.4. Zur Skalenabhängigkeit

Die Ausarbeitung der Skalenabhängigkeit im Arbeitsgebiet hat ergeben, dass diese wie von Schulze-Makuch postuliert nicht auftritt. Die Möglichkeit des Vergleichs aller drei Methoden hat sich nur bei den Messungen der vertikalen Durchlässigkeit angeboten. Hier ergab jedoch die Methode mit der kleinsten Skale 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 festgestellt werden. Vermutlich liegt dieser Trend in Zusammenhang mit dem gering durchlässigen Störungsmaterial. Bei Zunahme der Messskala wird immer mehr dieses Materials in die Messung miteinbezogen und es kommt daher zu einer Abnahme der Durchlässigkeit.

Ein weiterer Wert für die hydraulische Durchlässigkeit konnte aus Domberger et al. (2005) entnommen werden. Hier wurde aus einem Pumpversuch in Wiesfleck für die Durchlässigkeit ein Wert von  $2,55 \cdot 10^{-4} m/s$  ermittelt. Da die vertikale Durchlässigkeit durch die Verdichtung aber vermutlich zu gering eingeschätzt wird, konnte die aus dem Pumpversuch ermittelte Durchlässigkeit nicht für diesen Vergleich herangezogen werden. Vergleicht man diesen Wert jedoch mit denen der horizontalen Durchlässigkeit wird ersichtlich, dass ein Skaleneffekt offensichtlich nicht auftritt.

Der Trend der Abnahme der Durchlässigkeit tritt vermutlich nur bei kleinräumigen Skalen wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurden auf. Hier haben die Werte einen großen Einfluss auf die mittlere Durchlässigkeit, welcher jedoch bei großen Skalen anscheinend wieder vernachlässigbar klein wird. Dies zeigt auch das Ergebnis der OSO-WNW 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 Pumpversuchs. Die Annahme von Schulze-Makuch, dass es in einem homogenen Medium keinen Skaleneffekt gibt kann bestätigt werden, wenn man große Skalen miteinbezieht. Da es aber ein rein homogenes Material in der Natur nicht auftritt, 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.

Wendet man den von Rovey und Cherkauer (1995) entdeckten Zusammenhang zwischen Range der Varianz und Skalenabhängigkeit Durchlässigkeit (vgl. Kapitel 3) wird in den homogenen Messbereichen (OSO-WNW Wand) die „Upper Bound of Relationship“ schon nach 6,5cm erreicht. Bezieht man jedoch die Störungen in das Variogramm mit ein (SW-NO Wand) liegt die Obergrenze bei 23cm. Eine Skalenabhängigkeit auf so geringen Distanzen zu messen ist daher fast unmöglich.

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	VARIATION DER GESÄTTIGTEN LEITFÄHIGKEIT VERSCHIEDENEN RINGDURCHMESSERN (LAI UND REN 2007) .....	6
Abb. 2:	BEISPIEL FÜR DEN ZUSAMMENHANG ZWISCHEN HYDRAULISCHER DURCHLÄSSIGKEIT UND MESSSKALA AUS EINEM KARSTAQUIFER. ....	7
Abb. 3:	BESTIMMUNG DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT IN EINEM HOMOGENEN SANDSTEIN MIT ZUNEHMENDER SKALA .....	8
Abb. 4:	VERLAUF DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT MIT STEIGENDER SKALA (FALLICO ET AL. 2010) .....	10
Abb. 5:	VERLAUF DER POROSITÄT MIT ANSTIEGENDER SKALA (FALLICO ET AL. 2010) .....	10
Abb. 6:	LINKS: SKALENABHÄNGIGKEIT DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT MIT DEN JEWEILIGEN SCALE LAWS. RECHT: DIE SKALENABHÄNGIGKEIT DES SPEICHERKOEFFIZIENTEN (FALLICO ET AL. 2012). ....	10
Abb. 7:	ANSTIEG DER HYDR. DURCHLÄSSIGKEIT MIT ANSTIEGENDER MESSSKALA (ROVEY UND CHERKAUER 1995) .....	12
Abb. 8:	SEMIVARIOGRAMM ZU DEN MESSERGEBNISSEN AUS ABB. 7 (ROVEY UND CHERKAUER 1995) .....	12
Abb. 9:	GEOLOGISCHE KARTE DES STEIRISCHEN BECKENS (VEREINFACHT NACH (GROSS ET AL. 2007)) .....	13
Abb. 10:	DIE ENTWICKLUNG DES STEIRISCHEN BECKENS (DOMBERGER ET AL. 2005; SACHSENHOFER ET AL. 1996) .....	14
Abb. 11:	PALÄOGEOGRAPHIE IM UNTEREN BADENIUM (NACH EBNER UND SACHSENHOFER 1995) .....	17
Abb. 12:	STRATIGRAPHISCHE TABELLE DES NEOGEN DES WEST- UND OSTSTEIRISCHEN BECKEN (GROSS ET AL. 2007; PILLER ET AL. 2004).....	20
Abb. 13:	SCHICHTUNG DER SEDIMENTE IN DER SANDGRUBE ULREICH. ....	21
Abb. 14:	TINY PERM MESSUNGEN AN EINEM AUFGE SPANNETEN NETZ. ....	23
Abb. 15:	AUSGEWÄHLTEN MESSAREALE SOWIE DIE MESSMETHODEN .....	25
Abb. 16:	TINY PERM: GERÄT UND MESSUNG .....	27
Abb. 17:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES EINZELRING-INFILTRMETER (REYNOLDS UND ELRICK 1990) .....	32
Abb. 18:	VARIOGRAMM MIT PARAMETERN NUGGET, SILL UND RANGE (BLÖSCHL 2006) .....	34
Abb. 19:	MESSFLÄCHE AN DER SO-NW WAND. ....	37
Abb. 20:	VERTEILUNG DER RELATIVEN HÄUFIGKEIT UND QQ-PLOT DER TINY PERM MESSUNGEN. ....	38
Abb. 21:	VERTEILUNG DER RELATIVEN HÄUFIGKEIT UND QQ-PLOT DER DER HYDR. DURCHLÄSSIGKEIT DER STECHZYLINDER. BEI DER BERECHNUNG WURDEN DIE WERTE DER STÖRUNG VERNACHLÄSSIGT. SOWOHL HÄUFIGKEITSVERTEILUNG ALS AUCH QQ-PLOT LASSEN EINE NORMALVERTEILUNG ANNEHMEN. ....	40
Abb. 22:	AUSWERTUNG DER BODENPHYSIKALISCHEN PARAMETER DER SW-NO WAND .....	41
Abb. 23:	MESSBEREICH OSO-WNW WAND. ....	42
Abb. 24:	VERTEILUNG DER RELATIVEN HÄUFIGKEIT UND QQ-PLOT DER TINY PERM MESSUNGEN. ....	43
Abb. 25:	VERTEILUNG DER RELATIVEN HÄUFIGKEIT UND QQ-PLOT DER DER HYDR. DURCHLÄSSIGKEIT DER STECHZYLINDER. ....	45
Abb. 26:	AUSWERTUNG DER BODENPHYSIKALISCHEN PARAMETER DER OSO-WNW WAND .....	46
Abb. 27:	VERTEILUNG DER RELATIVEN HÄUFIGKEIT UND QQ-PLOT DER DER HYDR. DURCHLÄSSIGKEIT DER TINY PERM MESSUNGEN .	47
Abb. 28:	LINKS: VERGLEICH DER DURCHLÄSSIGKEIT MIT STEIGENDER ANZAHL DER STÖRUNGEN. (TINY PERM) RECHTS: DURCHLÄSSIGKEIT DER STÖRUNGEN. ....	49

Abb. 29:	VERGLEICH DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT MIT ANSTIEGENDER ZAHL DER STÖRUNGEN (STECHZYLINDER).....	51
Abb. 30:	BODENPHYSIKALISCHE PARAMETER DER VERTIKAL ENTNOMMENEN STECHZYLINDER.....	53
Abb. 31:	VERGLEICH DER METHODEN UND IHRE ERGEBNISSE DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT. ....	55
Abb. 32:	RICHTUNGSABHÄNGIGKEIT DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT.....	56
Abb. 33:	STÖRUNGEN IM ARBEITSGEBIET. ....	57
Abb. 34:	STEREOGRAPHISCHE PROJEKTION UNTERE HALBKUGEL DER STÖRUNGSFLÄCHEN. ....	58
Abb. 35:	SCHEMATISCHE SKIZZE DER MESSRICHTUNGEN AN DEN STÖRUNGEN. $K_{\text{PARALLEL}}$ = DURCHLÄSSIGKEIT PARALLEL ZUR STÖRUNGSFLÄCHE, $K_{\text{VERTIKAL}}$ = VERTIKAL AUF DIE STÖRUNGSFLÄCHE	59
Abb. 36:	ENTNAHME EINER STECHZYLINDERPROBE PARALLEL ZUR STÖRUNG 332/80.....	60
Abb. 37:	DURCHLÄSSIGKEIT DER DREI STÖRUNGEN, VERTIKAL UND PARALLEL DAZU. ....	61
Abb. 38:	AUSWERTUNG DER STECHZYLINDERPROBEN AUS DEN STÖRUNGEN AUF IHRE BODENPHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN .....	63
Abb. 39:	INTERAKTION ZWISCHEN POROSITÄT, TROCKENDICHTE UND HYDRAULISCHER DURCHLÄSSIGKEIT. ....	64
Abb. 40:	SKALENABHÄNGIGKEIT DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT. ....	65
Abb. 41:	VARIOGRAMM DER TINY PERM MESSUNGEN DER SW-NO WAND .....	67
Abb. 42:	KRIGING ERGEBNIS DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT DER SW-NO. RECHTS.....	68
Abb. 43:	VARIOGRAMM DER TINY PERM MESSUNGEN DER OSO-WNW WAND .....	69
Abb. 44:	KRIGING ERGEBNIS DER HYDRAULISCHEN DURCHLÄSSIGKEIT DER SW-NO. RECHTS.....	70

## Literaturverzeichnis

Bagarello, V.; Sgroi, A. (2004): Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. In: *Soil and Tillage Research* 76 (1), S. 13–24. DOI: 10.1016/j.still.2003.08.008.

Beerten, K.; Vandersmissen, N.; Rogiers, B.; Mallants, D. (2012): Assessing soil hydrological variability at the cm- to dm-scale using air permeameter measurements. In: *Geophysical Research Abstracts* 14.

Blöschl, Günter (2006): Geostatistische Methoden bei der hydrologischen Regionalisierung. In: *Wiener Mitteilungen* 197, S. 21–40.

Bredner, Barbara (2017): Statistische Beratung und Lösungen, online verfügbar unter: <http://www.bb-sbl.de/>

Buckingham, E. (1907): Studies on the movement of soil moisture. Washington: Govt. Print. Off. (38).

Darcy, H. (1856): Les Fontaines Publiques de Id Ville de Dijon.

Domberger, G.; Erhart-Schipppek, 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, Fritz (1988): Das Paläozoikum in den RAG-Bohrungen. Blumau 1, 1a und Arnwiesen 1 (Oststeirisches Tertiärbecken). In: *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* 131 (4), S. 563–573.

Ebner, Fritz; Sachsenhofer, Reinhard F. (1991): Die Entwicklung des steirischen Tertiärbeckens. In: *Mitteilung Abteilung Geologie und Paläontologie am Landesmuseum Joanneum* (49).

Ebner, Fritz; Sachsenhofer, Reinhard F. (1995): Palaeogeography, subsidence and thermal history of the Neogene Styrian Basin (Pannonian basin system, Austria). In: *Tectonophysics* 242 (1-2), S. 133–150. DOI: 10.1016/0040-1951(94)00155-3.

Eijkelkamp (2015): Doppelring-Infiltrometer. Gebrauchsanweisung. Niederlande.

- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2013): Laboratory-Permeameters. Operating Instructions. Eijkelkamp Soil & Water. Niederlande, Giesbeek. Online verfügbar unter <https://en.eijkelkamp.com/products/laboratory-equipment/soil-water-permeameters.html>.
- Fallico, C.; Bartolo, S. de; Troisi, S.; Veltri, M. (2010): Scaling analysis of hydraulic conductivity and porosity on a sandy medium of an unconfined aquifer reproduced in the laboratory. In: *Geoderma* 160 (1), S. 3–12. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.09.014.
- Fallico, Carmine; Vita, Maria Chiara; Bartolo, Samuele de; Straface, Salvatore (2012): Scaling Effect of the Hydraulic Conductivity in a Confined Aquifer. In: *Soil Science* 177 (6), S. 385–391. DOI: 10.1097/SS.0b013e31824f179c.
- Fitts, Charles R. (2013): Principles of Flow. In: *Groundwater Science*: Elsevier, S. 47–96.
- Friebe, Georg J. (1990): Lithostratigraphische Neugliederung und Sedimentologie der Ablagerungen des Badenium(Miozän) um die Mittelsteirische Schwelle (Steirisches Becken, Österreich). In: *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* 133 (2), S. 223–257.
- Friebe, J.Georg (1991): Carbonate Sedimentation within a Siliciclastic Environment: The Leithakalk of the Weissenegg Formation (Middle Miocene; Styrian Basin, Austria). In: *Zentralbl. Geol. Paläont.* 1990 (Teil I), S. 1671–1687.
- Friebe, J.Georg (1993): Sequence stratigraphy in a mixed carbonate-siliclastic depositional system (Middle Miocene; Styrian Basin, Austria). In: *Geol Rundsch* 82 (2). DOI: 10.1007/BF00191834.
- Ghanbarian, Behzad; Taslimitehrani, Vahid; Dong, Guozhu; Pachepsky, Yakov A. (2015): Sample dimensions effect on prediction of soil water retention curve and saturated hydraulic conductivity. In: *Journal of Hydrology* 528, S. 127–137. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.024.
- Gogging, D. J.; Tharasher, R. L.; Lake, L. W. (1988): A theoretical and experimental analysis of minipermeameter response including gas slippage and high velocity flow effect. In: *In Situ* 12, S. 79–116.
- Gross, Martin; Fritz, Ingomar; Piller, Werner E.; Soliman, Ali; Harzhauser, Mathias; Hubmann, Bernhard et al. (2007): Das Neogen des Steirischen Beckens - Exkursionsführer. In: *Joanneum Geologie und Paläontologie* (9), S. 117–193.

Guimerà, J.; Vives, L.; Carrera, J. (1995): A discussion of scale effects on hydraulic conductivity at a granitic site (El Berrocal, Spain). In: *Geophys. Res. Lett.* 22 (11), S. 1449–1452. DOI: 10.1029/95GL01493.

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. In: *Vadose Zone Journal* 2 (4), S. 618–626. DOI: 10.2113/2.4.618.

Jensen, J. L.; Glasbey, C. A.; Corbett, P.W.M. (1994): On the interaction of geology, measurement, and statistical analysis of small-scale permeability measurements. In: *Terra Nova* 6 (4), S. 397–403. DOI: 10.1111/j.1365-3121.1994.tb00513.x.

Kollmann, Kurt (1964): Jungtertiär im Steirischen Becken. In: *Mitteilung der Geologischen Gesellschaft Wien* 57 (2).

Lai, Jianbin; Ren, Li (2007): Assessing the Size Dependency of Measured Hydraulic Conductivity Using Double-Ring Infiltrimeters and Numerical Simulation. In: *Soil Science Society of America Journal* 71 (6), S. 1667. DOI: 10.2136/sssaj2006.0227.

Pebesma, Edzer; Graeler, Benedikt (2004): Multivariable geostatistics in S: the gstat package. In: *Computers & Geoscience* 30, S. 683–691.

Perroux, K. M.; White, I. (1988): Designs for Disc Permeameters<sup>1</sup>. In: *Soil Science Society of America Journal* 52 (5), S. 1205. DOI: 10.2136/sssaj1988.03615995005200050001x.

Piller, Werner E.; Egger, Hans; Gross, Martin; Harzhauser, Mathias; Hubmann, Bernhard; Husen, van Dirk et al. (2004): Die stratigraphische Tabelle von Österreich 2004 (Sedimentäre Schichtfolgen). In: *Ber. Inst. Erdwiss. K.-F.-Univ. Graz* 9.

Plagge, Rudolf; Renger, Manfred; Röth, Christian H. (1990): A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures. In: *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 153 (1), S. 39–45. DOI: 10.1002/jpln.19901530109.

Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. (1985): IN SITU MEASUREMENT OF FIELD-SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY, SORPTIVITY, AND THE  $\alpha$ -PARAMETER USING THE GUELPH PERMEAMETER. In: *Soil Science* 140 (4), S. 292–302. DOI: 10.1097/00010694-198510000-00008.

Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. (1990): Poned Infiltration from a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow. In: *Soil Sci. Soc. Am.* 54, S. 1233–1241.

Ribeiro, JR P.J.; Diggle, P. J. (2001): geoR: A package for geostatistical analysis. In: *R-NEWS* 1 (2). Online verfügbar unter <http://cran.r-project.org/doc/Rnews>.

Richards, L., A. (1931): Capillary conduction through porous mediums. In: *Physics* 1, S. 318–333.

Rodgers, M.; Mulqueen, J. (2006): Field-saturated hydraulic conductivity of unsaturated soils from falling-head well tests. In: *Agricultural Water Management* 79 (2), S. 160–176. DOI: 10.1016/j.agwat.2005.02.011.

Rogiers, Bart; Beerten, Koen; Smeekens, Tuur; Mallants, Dirk; Gedeon, Matej; Huysmans, Marijke et al. (2014): The usefulness of outcrop analogue air permeameter measurements for analyzing aquifer heterogeneity. Quantifying outcrop hydraulic conductivity and its spatial variability. In: *Hydrol. Process.* 28 (20), S. 5176–5188. DOI: 10.1002/hyp.10007.

Rovey, Charles W.; Cherkauer, Douglas S. (1995): Scale Dependency of Hydraulic Conductivity Measurements. In: *Ground Water* 33 (5), S. 769–780. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1995.tb00023.x.

Sachsenhofer, R F; Sperl, H; Wagini, A (1996): Structure, development and hydrocarbon potential of the Styrian Basin (Pannonian Basin system, Austria). In: *Wessely, G. & Liebl, W. (eds): Oil and Gas in Alpidic Thrustbelts and Basins of Central and Eastern Europe 5* (EAGE Spec. Publ.), S. 393–414.

Sachsenhofer, Reinhard F.; Lankreijer, Anco; Cloetingh, Sierd; Ebner, Fritz (1997): Subsidence analysis and quantitative basin modelling in the Styrian Basin (Pannonian Basin System, Austria). In: *Tectonophysics* 272 (2-4), S. 175–196. DOI: 10.1016/S0040-1951(96)00257-0.

Salako, A. O.; Adepelumi, A. A. (2016): Evaluation of hydraulic conductivity of subsoil using electrical resistivity and ground penetrating radar data. Example from Southwestern Nigeria. In: *Geo-Engineering* 7 (1), S. 1221. DOI: 10.1186/s40703-016-0018-7.

Schulze-Makuch, D.; Carlson, Douglas A.; Cherkauer, Douglas S.; Malik, Peter (1999): Scale Dependency of Hydraulic Conductivity in Heterogeneous Media. In: *Ground Water* 37 (6), S. 904–919. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1999.tb01190.x.

Schulze-Makuch, Dirk; Cherkauer, Douglas S. (1995): Facies dependent scale behaviour of hydraulic conductivity and longitudinal dispersivity. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 32 (7), S. 311. DOI: 10.1016/0148-9062(95)92314-8.

Schulze-Makuch, Dirk; Cherkauer, Douglas S. (1997): Method developed for extrapolating scale behavior. In: *Eos Trans. AGU* 78 (1), S. 3. DOI: 10.1029/97EO00005.

Schulze-Makuch, Dirk; Cherkauer, Douglas S. (1998): Variations in hydraulic conductivity with scale of measurement during aquifer tests in heterogeneous, porous carbonate rocks. In: *Hydrogeology Journal* 6 (2), S. 204–215. DOI: 10.1007/s100400050145.

Spektrum Akademischer Verlag (Hg.) (2000): *Hydraulische Leitfähigkeit. Lexikon der Geowissenschaften.* Online verfügbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/hydraulische-leitfaehigkeit/7201>.

Stibinger, Jakub (2014): *Examples of Determining the Hydraulic Conductivity of Soils. Theory and Applications of Selected Basic Methods.* Jan Evangelista Purkyně University Faculty of the Environment.

Vindum Engineering, Inc.: *Tiny Perm II Portable Air Permeameter. User's Manual.* Online verfügbar unter [www.vindum.com](http://www.vindum.com).

Webster, Richard; Oliver, Margaret A. (2007): *Geostatistics for environmental scientists.* 2. ed. Chichester: Wiley (Statistics in practice).

Wuest, Stewart B. (2005): Bias in Poned Infiltration Estimates Due to Sample Volume and Shape. In: *Vadose Zone Journal* 4 (4), S. 1183. DOI: 10.2136/vzj2004.0184.

Zhang, Renduo (1997): Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. In: *Soil Science Society of America Journal* 61 (4), S. 1024. DOI: 10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x.









# Anhang B

## Auswertung der vertikalen Durchlässigkeit und der Störungen

Tiny Perm Ergebnisse Infiltrometer Durchlässigkeit als log(Ks)				
Infiltrometer 1	Infiltrometer 2	Infiltrometer 3	Störung N-S	Störung NNO-SSW
-4.64	-3.08	-3.91	-3.64	-4.71
-4.43	-3.64	-3.88	-3.12	-5.31
-3.61	-3.21	-3.72	-4.51	-6.38
-3.79	-3.15	-4.03	-4.21	-5.43
-3.84	-3.21	-3.84	-3.36	-4.92
-4.52	-2.81	-3.91	-4.68	
-4.00	-3.08	-4.71	-4.54	
-3.90	-3.42	-5.31	-3.91	
-3.73	-4.10	-5.17	-3.88	
-3.75	-3.79	-5.43	-3.72	
-4.09	-2.83	-4.92	-4.03	
-3.81	-3.44	-3.94	-3.84	
-3.81	-3.45	-3.81	-3.91	
-3.99	-3.64	-3.51		
-3.90	-3.12	-3.63		
-4.40	-4.51	-3.85		
-3.78	-4.21	-3.75		
-3.55	-4.85			
-4.03	-4.68			
-3.66	-4.54			
-3.85				

Tiny Perm Störungen		
E_St	W_St	S_St
-5.64	-5.38	-5.56
-6.23	-5.38	-7.90
-5.89	-5.10	-7.06
-6.04	-5.01	-5.31
-4.89	-5.52	-5.26
-5.61	-4.89	-5.43
-6.62	-4.91	-5.50
-5.47	-5.75	-5.06
-4.70	-3.97	
-5.52	-3.94	
-5.40	-4.42	
-5.40	-4.60	
-5.20	-2.94	
-5.84	-2.87	
-6.20	-5.12	
-5.70	-5.00	
-5.22	-5.41	
-6.08	-5.23	
-5.28	-5.19	
-4.92	-4.73	
-4.67	-5.00	
-4.34	-6.02	
-3.64	-4.89	
-3.12	-4.80	
-4.51	-4.09	
-4.21	-3.91	
-4.85	-3.88	
-4.65	-3.72	
-4.54	-4.03	
-4.71	-3.84	
-5.31	-3.91	
-6.38		
-5.43		
-4.92		

Stechzylinder SW-NO Wand	
SZ. Nr.	log(Ks)
22	-3.68
4	-3.54
21	-3.77
24	-3.90
42	-3.45
28	-3.54

Stechzylinder OSO-WNW Wand	
SZ. Nr.:	log (Ks)
44	-3.57
38	-4.11
27	-3.34
35	-3.53
26	-3.73
31	-3.40
40	-3.32
36	-3.45
37	-3.56

SZ. Nr.	Stechzylinder Störungen	
	Log(Ks)	Bemerkung
41	-2.32	338/85 (vert.)
47	-4.10	338/85 (paral.)
25	-3.66	130/72
32	-4.24	280/60
17	-4.72	280/60 (Inf. 2)
7	-2.33	280/60 (Inf. 3)
1	-4.84	130/72 (Inf. 3)
3	-4.03	280/70 (NW-SO) Wand
23	-4.01	280/70 (NW-SO) Wand

SZ. Nr.	Stechzylinder Infiltrometer	
	Log(Ks)	Bemerkung
6	-3.93	Inf. 1
9	-4.20	
2	-4.65	
11	-3.86	Inf. 2
8	-4.21	
5	-3.97	Inf. 3
20	-4.42	

# Anhang C

## Bodenphysikalische Auswertungen der Stechzylinder

<b>Bodenphysikalische Parameter</b>				
<b>SW-NO Wand</b>				
Zyl. Nr.:	Lagerungsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Feststoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Porosität	Sättigungsgrad (%)
28	1.593	2.403	0.337	0.000
42	1.575	2.390	0.341	0.261
23	1.651	2.524	0.346	0.283
22	1.568	2.439	0.357	0.244
4	1.557	2.384	0.347	0.245
21	1.558	2.450	0.364	0.236
3	1.691	2.332	0.275	0.105
24	1.603	2.421	0.338	0.281
<b>OSO-WNW Wand</b>				
Zyl. Nr.:	Lagerungsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Feststoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Porosität	Sättigungsgrad (%)
31	1.527	2.371	0.356	0.281
36	1.564	2.490	0.372	0.312
40	1.473	2.249	0.345	0.594
37	1.647	2.582	0.362	0.240
26	1.628	2.532	0.357	0.297
33	1.613	2.493	0.353	0.365
38	1.673	2.554	0.345	0.354
27	1.561	2.431	0.358	0.260
35	1.559	2.475	0.370	0.257
44	1.552	2.433	0.362	0.257
<b>Infiltrationsversuch 1</b>				
Zyl. Nr.:	Lagerungsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Feststoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Porosität	Sättigungsgrad (%)
2	1.666	2.432	0.315	0.676
9	1.688	2.446	0.310	0.626
6	1.587	2.464	0.356	0.551
<b>Infiltrationsversuch 2</b>				
Zyl. Nr.:	Lagerungsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Feststoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Porosität	Sättigungsgrad (%)
17	1.720	2.471	0.304	0.760
8	1.649	2.439	0.324	0.657
11	1.631	2.456	0.336	0.435
<b>Infiltrationsversuch 3</b>				
Zyl. Nr.:	Lagerungsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Feststoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Porosität	Sättigungsgrad (%)
1	1.745	2.533	0.311	0.810
20	1.682	2.514	0.331	0.749
7	1.644	2.665	0.383	0.830
5	1.581	2.463	0.358	0.500
<b>Störungen</b>				
Zyl. Nr.:	Lagerungsdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Feststoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Porosität	Sättigungsgrad (%)
41	1.561	2.559	0.390	0.344
25	1.688	2.714	0.378	0.344
32	1.586	2.558	0.380	0.292
47	1.616	2.517	0.358	0.416
1	1.745	2.533	0.311	0.810
3	1.691	2.332	0.275	0.105
7	1.644	2.665	0.383	0.830
17	1.720	2.471	0.304	0.760
23	1.651	2.524	0.346	0.283

