

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1992. Wasserwirtschaftskataster. Straßenabwässer A 23/Bereich Knoten Kaisermühlen, S. 91-92.

Burghardt, W., 1999: Zur Konzeption der Bodenuntersuchungen für eine Regenwasserversickerung in Mulden. In: Burghardt, W., B. Mohs, G. Winzig: Regenwasserversickerung und Bodenschutz. BVB-Materialien, 2, 16-30. Bundesverband Boden, Berlin.

Christensen, H. 1989: Cadmium Soil Sorption at Low Concentrations. Dpt. of Environmental Engineering, Technical Univ. of Denmark.

Dauber L., B. Novak, J. Zobrist, F. Zürcher, 1979. Schmutzwasser im Regenwasserkanal einer Autobahn. In: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 64. Beeinflussung der Gewässergüte durch die Regenabflüsse von Straßen. 54. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium, S. 45. Univ. Stuttgart.

DVWK-Merkblatt 212, 1988. Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen, Teil I: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. Parey, Hamburg.

Fritzer, H., 1992. BM für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 406, Straßenforschungsvorhaben Nr. 3063, S. 27. Wien.

Gabriel, 1984. In: LAUBER, W., 1993: Cadmium in Österreich. Umweltbelastung und Umweltschutz.

Hedley, G., Lockley, J.C., 1975. Quality of water discharged from an urban motorway. - Water Pollution Control, Part 6, S. 659-674 - in: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 64 (1979), S. 51.

Krauth, K., 1979. Untersuchung über die Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser in Abhängigkeit der Luftverschmutzung. In: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 64, S.14.

Krauth, K. und Klein, H., 1982, Untersuchung über die Beschaffenheit des Oberflächenwassers von Bundesautobahnen. Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 363

Krauth, K., Stolz, G. (Hrsg.), 1987. Menge und Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser beim Abfluß über bewachsene Seitenstreifen, Mulden und Böschungen (Auswertung von Forschungsarbeiten). - Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 509. Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.

Michenfelder, A., 1993. Labor- und Geländeuntersuchungen zum Transportverhalten und Rückhaltevermögen landwirtschaftlich genutzter Böden gegenüber Schwermetallen und Pflanzenschutzmitteln. In: Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 27.

Mitterer, J., 1988. Erfassung gelöster und partikulärer anorganischer Inhaltsstoffe in Gewässern und Regenwasserkanälen nach Regenereignissen, Diplomarbeit an der Univ. f. Bodenkultur, Wien. - In: Österreichische Wasserwirtschaft 11/12, Dez.1991, S. 293.

Müller, 1997. Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodendatenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.

Ökoplan, 1993. Straße und Gewässerschutz. Gütewasserwirtschaftliche Auswirkungen der Straßenentwässerung im Autobahn- und Schnellstraßennetz NÖs. Kurzfassung des Schlußberichts, Anlage 3. Amt der NÖ Landesregierung, Abt. B/9 und B/2-A.

Roberts, P.V., Dauber, L., Novak, B., Zobrist, J., 1979. Schmutzstoffe im Regenwasser einer städtischen Trennkanalesation. - Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 64.

Schöllner, F., Stürzer, R., Kleiber, E., 1991. Straßenabwässer - von der Entstehung bis zur Reinigung. - Österreichische Wasserwirtschaft 11/12 1991, S. 290-298.

Sieker, F., Grottker, M., 1988.: Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser bei mittlerer Verkehrsbelastung. - In: Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 530, Univ. Hannover. Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.

## DIE MODIFIZIERUNG DES WASSERAUFNAHMEVERSUCHES NACH ENSLIN-NEFF

Kugler, H.<sup>1</sup>, Schwaighofer, B.<sup>1</sup>, Gruber, S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordan-Straße 70, A-1190 Wien, Tel.: ++43-(0)1-47654 / 5412 oder 5400, Fax: ++43-(0)1-47654 / 5449, e-mail: kugler@edv1.boku.ac.at

<sup>2</sup> Institut für Technologie und Warenwirtschaftslehre, Wirtschaftsuniversität Wien, Augasse 2 - 6, 1090 Wien, Tel.: ++43 1 31336-4822, Fax: ++43 1 31336-706, e-mail: gruber.susanne@aon.at.

### Kurzfassung

Der Wasseraufnahmeversuch nach dem Prinzip Enslin kann auf Grund verschiedener zur Verfügung stehender Geräte, aber auch uneinheitlicher, bzw. wenig standardisierter Versuchsdurchführungen große Unterschiede in den Ergebnissen aufweisen.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, an Hand von 15 zum Teil sehr variablen Proben der Fraktionen < 0,02 mm die Unterschiede und Mängel üblicher Versuchsdurchführungen aufzuzeigen und modifizierten Vorgangsweisen gegenüberzustellen.

Weiters werden die Auswirkungen der Wahl der Methode auf die Ergebnisse sowie deren Aussagekraft diskutiert.

### 1 Problemstellung

Der Wasseraufnahmeversuch nach Enslin findet in zahlreichen Bereichen Anwendung: Etwa zur Bodenklassifikation im Erd- und Grundbau gemäß DIN 18132 (1995), im Straßenbau gemäß RVS 11.062 (1997), zur Qualitätskontrolle von Bentoniten, zur Untersuchung mineralischer Dichtungsmaterialien im Deponiebau oder zur Bestimmung der Plastizität von Tonen in der Grobkeramik.

Aus der Praxis und eigenen Untersuchungen ist allerdings bekannt, dass die Versuchsdurchführung mit Unsicherheiten hinsichtlich Aussagekraft, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Geräte und Labors behaftet ist. Insbesondere unterschiedliche Normen und Geräte (in Deutschland und Österreich), sowie unklar definierte und voneinander abweichende Prüfverfahren sind dafür verantwortlich.

Ziel dieser Arbeit ist es, methodische Mängel hinsichtlich der üblicherweise angewandten Durchführungsbestimmungen gemäß DIN 18132 (1995) und RVS 11.062 (1997) zu identifizieren und zu minimieren und gleichzeitig die Aussagekraft modifizierter Versuchsdurchführungen und Probenaufbereitungen aufzuzeigen.

### 2 Materialien

Zur Anwendung kamen 15 Kornfraktionen < 0,02 mm, die mittels Nasssiebung aus weitgestuften Korngemischen (0/32 mm) gewonnen und nicht weiter vermahlen wurden. Bei diesen Korngemischen handelt es sich um gebrochene oder natürlich gerundete Gesteine, die als ungebundene Tragschichtmaterialien im Strassenbau zum Einsatz kommen.

Das Gesteinsspektrum umfasst magmatische, metamorphe und sedimentäre Gesteine (genaue Informationen zu den Materialien s. KUGLER et al, 2002 in diesem Band).

### 3 Methoden

Zunächst wurde das Wasseraufnahmeverfahren für Pulver nach Enslin in methodischer Hinsicht mit den Verfahren nach Enslin-Neff in modifizierter Form für Pulver, aber auch für Presspillen verglichen.

Darüber hinaus wurden die nach den verschiedenen Methoden ermittelten Wasseraufnahmen mit den Ergebnissen aus anderen Versuchen mit ähnlicher Aussage verglichen, woraus sich mehr oder weniger signifikante Zusammenhänge ergeben müssten. Dadurch sollte die Aussagekraft bzw. Qualität der einzelnen Methoden vergleichbar werden.

#### 3.1 Wasseraufnahme von Pulvern nach Enslin (gemäß RVS 11.062, 1997)

Die Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens nach Enslin erfolgte am ARC Seibersdorf research GmbH, Rohstoffe und Georiken an Hand eines in RVS 11.062 (1997), Blatt 12 beschriebenen Enslin-Gerätes (Fritte auf gleicher Höhe wie Kapillare, bzw. Messrohr). Die Untersuchungen wurden in weitgehender Anlehnung an RVS 11.062 (1997), Blatt 12 durchgeführt.

Unterschiede betrafen die verwendete Korngröße des Probenmaterials ( $< 0,02$  mm) sowie die eingewogene Probenmenge von 0,5 g an Stelle von 1 g. Weiters wurde nach dem vorgeschriebenen Abtupfen der Fritte mit Filterpapier ein Zeitraum von einer halben Minute bis zur Aufbringung der Probe zugewartet, um das dadurch verursachte Wiederauffüllen der Fritte mit Wasser nicht in das Messergebnis mit einfließen zu lassen. Der Zeitraum von einer halben Minute wurde aus Vorversuchen ermittelt.

In Ergänzung wurden die Wasseraufnahmen um die Verdunstung korrigiert. Diese wurde durch Mittelung von 3 Leermessungen angenähert und den Wasseraufnahmen in Abhängigkeit von der Dauer der Versuchsdurchführung einheitlich abgezogen.

Die Darstellung der Wasseraufnahme erfolgte gemäß RVS 11.062 (1997) nach 4 Std. in M.-% der Trockensubstanz  $< 0,02$  mm (Enslin-Werte) und ergänzend nach einheitlichem Abzug der gemittelten Verdunstung nach 4 Std. (Enslin<sub>korrt</sub>-Werte).

#### 3.2 Wasseraufnahme von Pulvern nach Enslin-Neff<sub>mod</sub>

Durch zahlreiche Vorversuche wurde eine modifizierte Vorgangsweise nach Enslin-Neff in Orientierung an DIN 18132 (1995), bzw. NEFF (1988) ausgearbeitet. Das verwendete Gerät unterscheidet sich vom herkömmlichen Enslin-Gerät gemäß RVS 11.062 (1997) im Wesentlichen durch die um 50 mm oberhalb des Niveaus des Messrohres angeordnete Fritte. Dies soll den kapillaren Anteil der Wasseraufnahme und damit den Einfluss der Höhe und der Form des Schüttkegels verringern (NEFF, 1959).

Die modifizierte Vorgangsweise Enslin-Neff<sub>mod</sub> unterscheidet sich von DIN 18132 (1995) hauptsächlich in folgenden Punkten:

- Applikation von 0,5 g der Fraktion  $< 0,02$  mm ohne Vermahlen
- Trocknung bei 60°C statt 105°C (Schonung quellbarer Phasen)
- Weitgehende Standardisierung der Raumbedingungen während Versuchsdurchführung durch Bau einer Probenkammer
- Standardisierung der Wassertemperatur
- Modifizierte Verdunstungskorrektur

Eine detaillierte Zusammenstellung der bis dato modifizierten Vorgangsweise in direkter Gegenüberstellung mit DIN 18132 (1995) und RVS 11.062 (1997) findet sich in KUGLER (2002).

#### 3.3 Wasseraufnahme von Presspillen nach Enslin-Neff<sub>mod</sub>

Die Versuchsdurchführung von Enslin-Neff<sub>mod</sub> wurde zu Vergleichszwecken auch bei Presspillen angewandt. Sowohl Material, als auch Einwaage entsprechen Kap. 3.2.

Durch die Verwendung pulvriger Proben könnten mineralogische Effekte dadurch überlagert werden, dass - durch zufällige Aufbereitungsunterschiede oder materialabhängig - stark unterschiedliche Lagerungsdichten der Pulver vorliegen. Damit sind auch die Schüttdichten und -höhen der erzeugten Kegel bzw. deren Porenräume nicht vergleichbar, wodurch zufällig hervorgerufene unterschiedliche kapillare Saugkräfte und damit Wasseraufnahmen induziert werden können.

Diese unerwünschten Nebeneffekte könnten standardisierte Presspillen mit praktisch einheitlicher (kapillarer) Ansaughöhe, gleichem Volumen (bei gleicher Einwaage) und gleicher Kontaktfläche zur porösen Fritte maßgeblich vermindern. Die irrelevant werdenden kapillaren Unterschiede müssten dadurch gegenüber mineralogischen und oberflächenbezogenen Effekten in den Hintergrund treten. Deshalb ist damit zu rechnen, dass die Versuchsdurchführung mittels Presspille eine andere Aussagekraft besitzt als mittels pulvriger Probe.

Die Herstellung der Presspillen erfolgte ohne jegliche chemische Zusätze mittels hydraulischer Presse (einheitlich Kraft von 130000 N appliziert). Dadurch wurden Presslinge von 1 cm Durchmesser und etwa 1,5 - 2 mm Höhe erzeugt.

#### 3.4 Ergänzende Methoden

Zur Beurteilung der Aussagekraft der verschiedenen Versuchsdurchführungen wurden die Wasseraufnahmen den entsprechenden Ergebnissen weiterer Materialcharakterisierungen gegenübergestellt.

##### 3.4.1 Wasserdampfadsorption

Die Bestimmung der Wasserdampfadsorption der Fraktionen  $< 0,02$  mm (nach Ofentrocknung bei 60°C) erfolgte bei verschiedenen Feuchtestufen im Zuge eines Desorptionsversuches im Exsikkatorverfahren. Es wurde dabei gemäß DIN EN ISO 12571 (2000) vorgegangen.

Zur Gegenüberstellung mit den Wasseraufnahmen wurden die Wasserdampfadsorptionen bei (theoretisch)  $75,47 \pm 0,14$  % (durch NaCl-gesättigte Lösung konstant gehalten) herangezogen.

##### 3.4.2 Methylenblau (MB)-Adsorption

Der laborintern festgelegte Untersuchungsgang orientiert sich an den Versuchsdurchführungen gem. RVS 11.062 (1997) und ÖN EN 933-9 (1999).

Eine detaillierte Zusammenstellung der Vorgangsweise in direkter Gegenüberstellung mit RVS 11.062 (1997) und ÖN EN 933-9 (1999) findet sich in KUGLER (2002).

##### 3.4.3 Kationenaustauschkapazität (KAK) mittels Cu-Komplex

Um die Aussagekraft der MB-Adsorption grundsätzlich zu verifizieren, wurde zusätzlich die KAK mittels Cu-Komplex bestimmt.

Dabei wird 200 mg der Fraktion  $< 0,02$  mm in 35 ml destilliertem Wasser in Suspension gebracht, mit Ultraschall dispergiert, auf 50 ml verdünnt und mit 10 ml einer 0,01 M Cu-Triethylentetramin-Sulfat-Lösung versetzt. Das Kationenaustauschvermögen wurde über photometrische Analysen bestimmt (MEIER & KAHR, 1999).

### 3.4.4 Spezifische Oberflächenladung (CaCl<sub>2</sub>)

Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche erfolgte nach der BET-Methode gemäß DIN 66131 (1993), die Oberflächenladung wurde am Institut für Bodenkunde der Universität Hannover mittels Partikelladungsdetektor (PCD) in CaCl<sub>2</sub> ermittelt (MEISSNER, 2002).

Aus gerätebedingten Gründen wurden die Messungen nur an den Fraktionen < 0,002 mm durchgeführt.

## 4 Resultate und Diskussion

### 4.1 Methodischer Vergleich Enslin / Enslin-Neff<sub>mod</sub>

Durch einen möglichst hohen Grad an standardisierter Versuchsdurchführung gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub> konnte eine hervorragende Vergleichbarkeit zwischen Geräten gleicher Bauart (Enslin-Neff) erreicht werden (s. Abb. 1, links). Besonders die errichtete Probenkammer und die standardisierte Wassertemperatur dürften dafür verantwortlich sein.

Aus der Regressionsgleichung lässt sich auf Grund der Steigung ≈ 1 und des geringen Ordinatenabstandes ablesen, dass im Wasseraufnahme-Bereich von 50 – 150 M.-% die relativen Abweichungen nur zwischen 2,2 % und 0,2 % liegen. Dieser minimale und wegen der hohen Korrelation offenbar systematische Fehler dürfte hauptsächlich auf geringfügige Unterschiede der Fritten beider Geräte zurückzuführen sein.

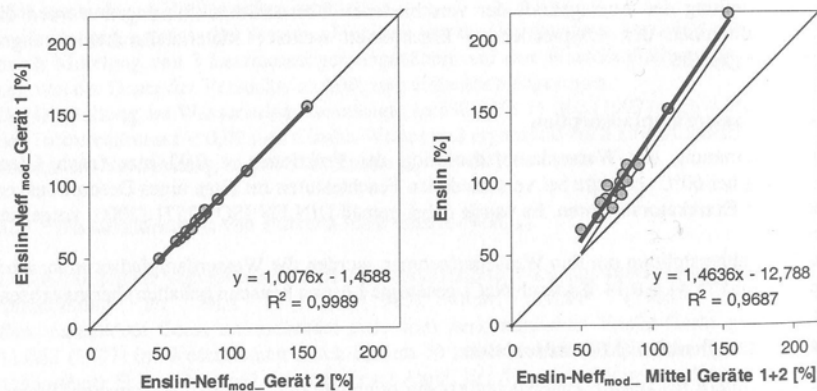


Abb. 1: Links: Vergleich der Ergebnisse von 2 gleichen Enslin-Neff-Geräten nach Versuchsdurchführung gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub>. Rechts: Vergleich der Ergebnisse der Versuchsdurchführung gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub> mit Enslin (ohne Verdunstungskorrektur). Die parallel verschobene Regressionsgerade für die Werte nach Enslin<sub>kor</sub> ist als dünne Linie angedeutet.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Enslin-Neff<sub>mod</sub> mit jenen von Enslin gemäß RVS 11.062 (1997) in Abb. 1, rechts lässt folgende Aussagen zu: Erstens zeigen die Wasseraufnahmen mittels Enslin-Gerät grundsätzlich höhere Werte (s. auch Abb. 2, links), was in erster Linie auf die erhöhte Kapillarität der Proben zurückzuführen ist, die sich auf der am Niveau des Messrohres gelegenen Fritte befinden. Zweitens liegt zwar eine gute, lineare Korrelation vor (zumindest ab Wasseraufnahmen von etwa 50 M.-%), die Linearität darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass bei diesem Zusammenhang auf Grund des relativ hohen (negativen) Ordinatenabstandes der linearen Re-

gressionsgleichung keine konstante prozentuelle Abweichung der Wasseraufnahmen resultiert. Das wäre im Idealfall nur bei einer Gleichung der Form  $y = k \cdot x$  gegeben.

Im Wasseraufnahme-Bereich von 50 – 250 M.-% steigt bei der Versuchsdurchführung nach Enslin (gemäß RVS ohne Verdunstungskorrektur) im konkreten Fall die zusätzliche (relative) Wasseraufnahme von 21 % auf 41 % an (s. Abb. 2, rechts).

Im Zuge der (in der RVS gar nicht vorgesehenen) Verdunstungskorrektur wurde ein aus Leermessungen gemittelter Wert von einheitlich 9 % (in Relation zur eingewogenen Trockenmasse der Proben) von der ermittelten „Wasseraufnahme“ abgezogen. Dadurch verschiebt sich die Regressionsgerade aus Abb. 1 (rechts) lediglich parallel (als dünne Gerade dargestellt). Auf Grund dessen steigt auch hier im Wasseraufnahme-Bereich von 50 – 250 M.-% gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub> die prozentuell erhöhte Wasseraufnahme überproportional an und zwar von 3 % auf 38 % (s. Abb. 2, rechts). Die Erhöhung der Wasseraufnahme bei stärker wasseradsorptiven Gesteinskörnungen nimmt also nicht linear, sondern überproportional zu.

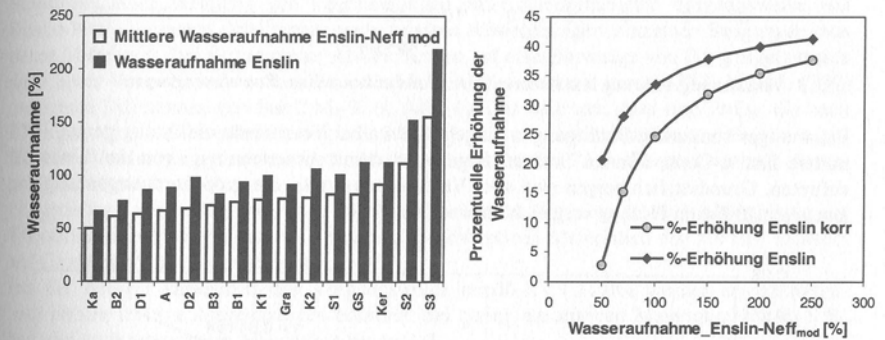


Abb. 2: Links: Vergleich der Wasseraufnahmen gemäß Enslin-Neff und RVS 11.062, 1997 (Abkürzungen für die Materialien s. KUGLER et al., 2002 in diesem Band). Rechts: Tendenz der überproportionalen Erhöhung der Wasseraufnahme gemäß Enslin und Enslin<sub>kor</sub> im Verhältnis zu Enslin-Neff<sub>mod</sub> in Abhängigkeit von der Adsorptivität der Materialien.

Weiters zeigt sich beim Vergleich Enslin-Neff<sub>mod</sub> mit Enslin in Abb. 1 (rechts), dass die Streuung der Ergebnisse um die lineare Regressionsgerade deutlich größer ist, als bei Gegenüberstellung zweier gleicher Geräte des Typs Enslin-Neff (s. Abb. 1, links).

Dies könnte zum Teil auf die fehlende bzw. mangelhafte Verdunstungskorrektur bei den Enslin-Werten zurückzuführen sein. Durch eine „geräteinterne“ Verdunstungskorrektur nach Enslin-Neff<sub>mod</sub> konnte eine Verbesserung der Aussagekraft des Enslinwertes, aber auch hinsichtlich des Geräte-, bzw. Zeitaufwandes erreicht werden.

Im Gegensatz zur Verdunstungskorrektur durch Mittelung von Leermessungen und Abzug der erhaltenen Werte nach definierter Zeit wird die Verdunstungskorrektur der Wasseraufnahme einer Probe gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub> unmittelbar an Hand der für eine Probe erhaltenen Daten durchgeführt.

Grundlage dafür ist die Erkenntnis, dass bei möglichst standardisierten und konstanten Versuchs- und Raumbedingungen (gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub>) die Verdunstung einer linearen Funktion folgt (s. Abb. 3). Die Geradensteigung ist dabei das Maß der Verdunstung in Abhängigkeit von der Zeit.



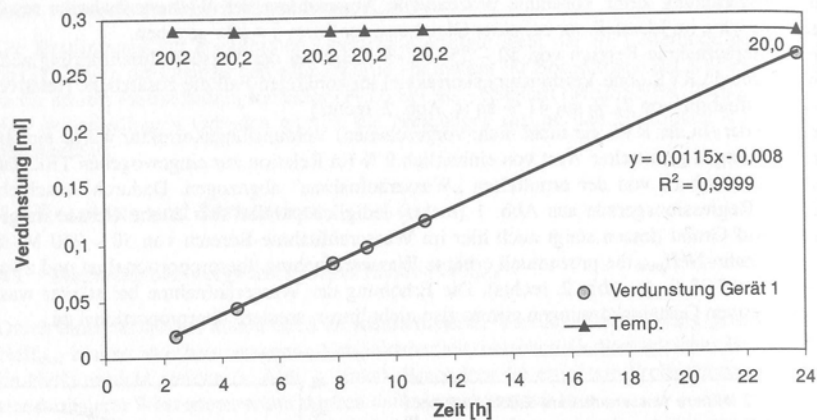


Abb. 3: Verdunstungsmessung und lineare Regression bei konstanten Raumbedingungen.

Bei weniger konstanten Bedingungen hingegen, etwa bei Versuchsdurchführung gemäß RVS mittels Enslin-Gerät, können Schwankungen und damit Abweichungen von der Linearität auftreten. Grundsätzlich zeigen sich aber Verdunstungswerte, die größenordnungsmäßig mit jenen gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub> vergleichbar sind (s. Abb. 4).

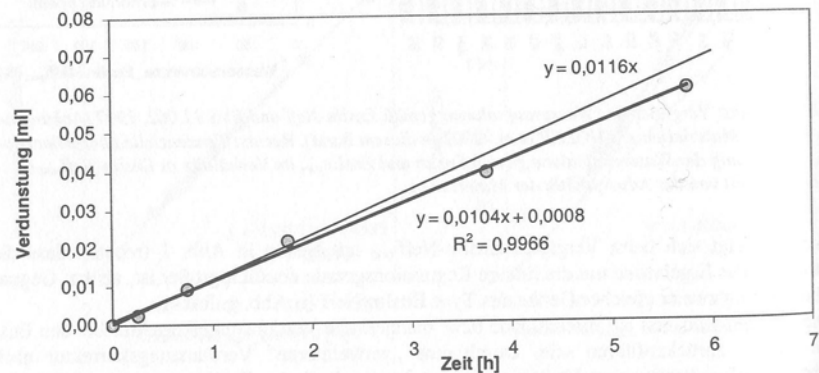


Abb. 4: Mittlere Verdunstung eines Enslin-Gerätes mit entsprechender Regression und zugehörigem Bestimmtheitsmaß. Die dünne Linie stellt die mittlere Steigung der Verdunstungsregressionen eines Enslin-Neff-Gerätes bei Vorgangsweise gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub> dar.

Auf Grund des Wissens und der Messbarkeit der Linearität der Verdunstung kann nun nach Zugabe der Probe der Zeitpunkt ermittelt werden, ab dem die Probe kein Wasser mehr aufnimmt und der gemessene Wasserverbrauch (= Wasseraufnahme der Probe + Verdunstung) nur mehr der Verdunstung entspricht. Dieser Zeitpunkt tritt nämlich dann ein, wenn die gekrümmte Kurve des Wasserverbrauches in die Linearität übergeht (s. Abb. 5, Mitte). Die Steigung dieser Linearen entspricht der Verdunstung von Wasser über die Proben- und nicht bedeckte Frittenoberfläche.

Diese Verdunstung wird schließlich von der gesamten Wasserverbrauchskurve ab Probenapplikation mit dem Ausmaß der Steigung der Regressionsgeraden abgezogen. Man erhält dadurch die Wasseraufnahmekurve der Probe (Abb. 5, unten).

Die Voraussetzung für eine derartige Vorgangsweise ist die Einhaltung standardisierter und konstanter Versuchsbedingungen, weil ansonsten die Bestimmung der Linearität und der im Endeffekt abzuziehenden Verdunstung ungenau wird.

Gemittelte Verdunstungsmessungen, die für eine ganze Messreihe von Proben Gültigkeit haben sollen (s. Kap. 3.1), weisen im Vergleich zu Enslin-Neff<sub>mod</sub> Nachteile auf. Auf Grund zahlreicher Leermessungen ist bekannt, dass durch konstante und standardisierte Versuchsbedingungen die Verdunstung zwar in nahezu perfekter Linearität ermittelt werden kann, allerdings trotzdem eine gewisse Streuung hinsichtlich der Steigungen der Regressionsgeraden aufweist.

Eine Mittelung der gemessenen Steigungen muss daher einen gewissen Fehler erzeugen. Selbst bei einer Mittelung von Leermessungen unter standardisierter Vorgangsweise von Enslin-Neff<sub>mod</sub> zeigen sich immer noch gewisse Abweichungen einzelner Steigungen von deren Mittelwert. Bei Bezug dieser Abweichungen auf eine Einwaage von 0,5 g ergeben sich nach einer Versuchsdauer von 4 Std. (entspricht Ablesezeitpunkt gemäß RVS 11.062, 1997) maximale Differenzen von fast 2 M.-% (s. Abb. 6). Das bedeutet, dass eine Probe, die nach Abzug der gemittelten Leermessung z.B. 70 M.-% Wasseraufnahme aufweist, bei probenspezifischer Verdunstungskorrektur unter Umständen 68 % oder 72 % Wasseraufnahme zu verzeichnen hätte.

Umgerechnet auf gering adsorptive Materialien bedeutet dies eine relative Abweichung der Wasseraufnahme von bis zu 3 %, bei sehr hoch adsorptiven Materialien von bis zu 1 % allein auf Grund des Fehlers der Mittelung.

Bei der weniger standardisierten Vorgangsweise gemäß RVS 11.062 wurden erwartungsgemäß höhere relative Abweichungen ermittelt: bei gering adsorptiven Materialien bis zu 5 %, bei sehr hoch adsorptiven Materialien bis zu 3 %.

Verdunstungskorrekturen an Hand von Leermessungen bedingen noch einen weiteren Fehler: Sie messen lediglich die Verdunstung über die Fritte und berücksichtigen nicht, dass während der gesamten Messdauer der Großteil der Fritte mit Probenmaterial bedeckt ist. Es hat sich bei Verdunstungsversuchen herausgestellt, dass die Verdunstung im Vergleich zur unbedeckten Fritte bei Probenzugabe meist geringer wird (Orientierungswert: Abnahme auf etwa 93 %). Dies könnte damit erklärt werden, dass, trotz Vergrößerung der Verdunstungsfläche durch die Probe, dieselbe die Durchlässigkeit für nachströmendes Wasser im Vergleich zur Fritte in noch stärkerem Ausmaß herabsetzt.

Das bedeutet, dass bei Verdunstungsermittlungen durch Nicht-Berücksichtigung der aufgebrauchten Probe (0,5 g) mit einem relativen Fehler, bzw. einem zu starken Wasserabzug von der Wasseraufnahme von bis zu 1 % gerechnet werden muss.

Bei einer Verdunstungskorrektur über gemittelte Leermessungen muss also auf Grund des Fehlers der Mittelung und der Nicht-Berücksichtigung der verdunstungshemmenden Probe mit insgesamt größeren Fehlern der Verdunstungskorrektur gerechnet werden als bei probenspezifischer Korrektur gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub>. Dieser Umstand dürfte zumindest teilweise für die größere Streuung der Werte bei Gegenüberstellung Enslin / Enslin-Neff<sub>mod</sub> im Vergleich zu 2 Enslin-Neff-Geräten verantwortlich sein (s. Abb. 1).

Bei Gegenüberstellung der Streuung aus Abb. 1, rechts mit der Streuung der Steigungen der Verdunstungsgeraden gemäß Enslin-Neff<sub>mod</sub> zeigt sich auch tatsächlich ein Zusammenhang (s. Abb. 7).



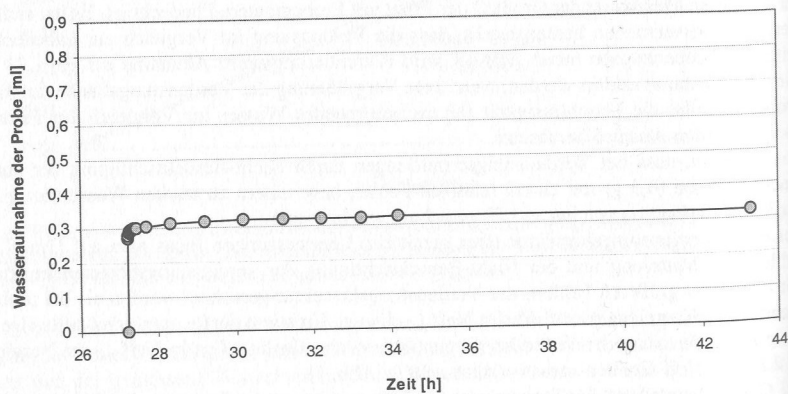
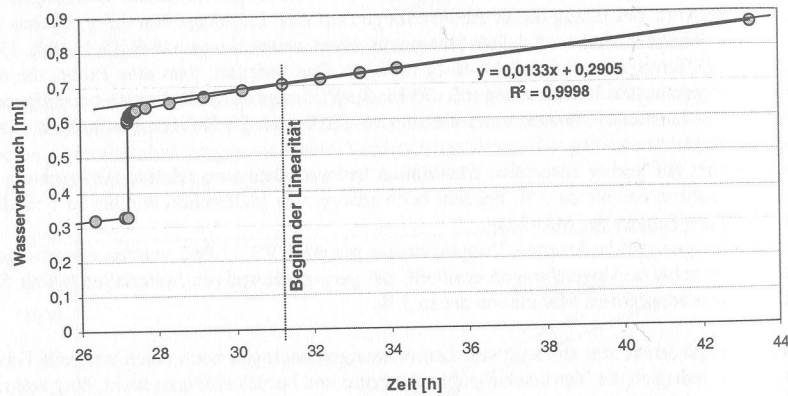
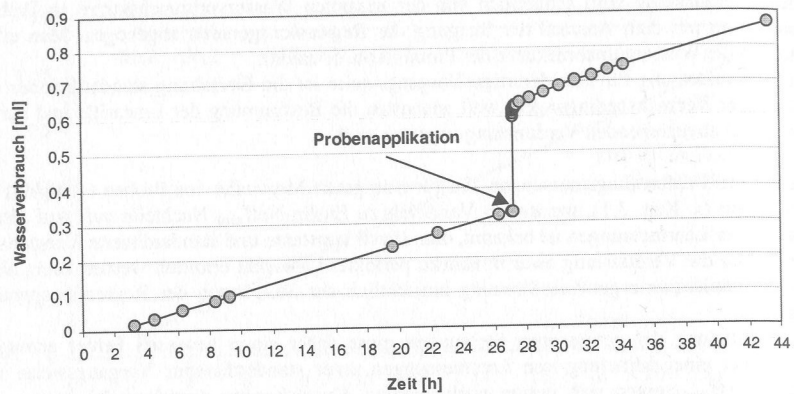


Abb. 5: Vorgang der Verdunstungskorrektur gemäß  $Enslin-Neff_{mod}$ . Oben: Probenzugabe (die Vorverdunstung vor Probenapplikation entfällt für den Routinebetrieb), Mitte: Identifikation des Beginns der Linearität und der Steigung der Regressionsgeraden, Unten: Um die Verdunstung korrigierte Wasserverbrauchswerte = Wasseraufnahme der Probe.

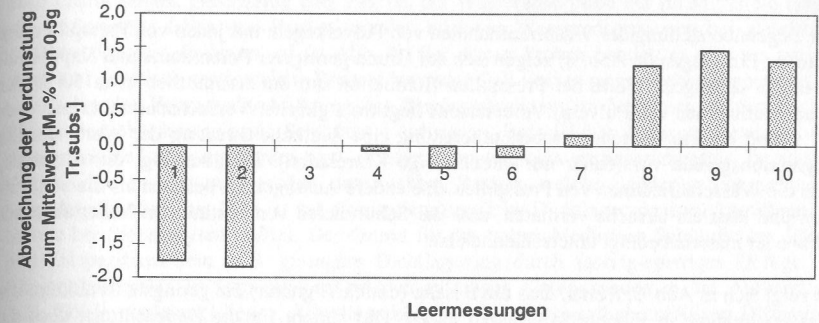


Abb. 6: Abweichungen der Verdunstung (bez. der Steigungen der Regressionsgeraden) einzelner Leermessungen von deren Mittelwert, umgerechnet in M.-% einer Einwaage von 0,5 g Trockensubstanz.

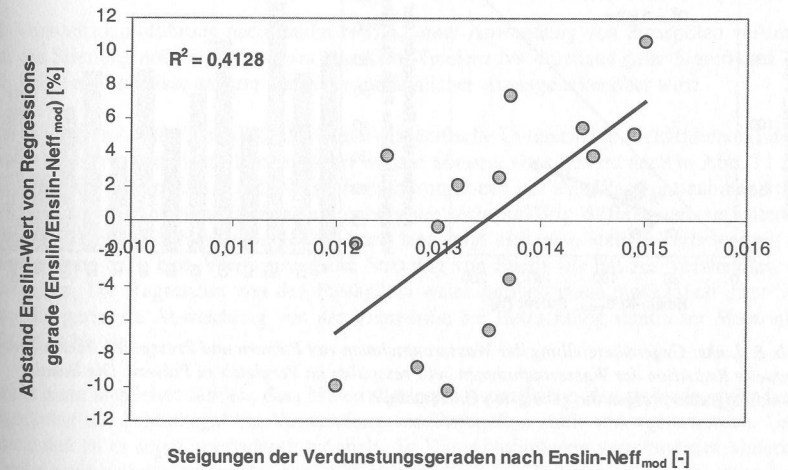


Abb. 7: Gegenüberstellung der Abstände der Enslin-Werte von der Regressionsgeraden aus Abb. 1, rechts mit der Streuung der Steigungen der Verdunstungsgeraden gemäß  $Enslin-Neff_{mod}$ .

Der Zusammenhang ist aber nur schwach bis mäßig, sodass nicht nur die unterschiedliche Vorgangsweise bei der Ermittlung der Verdunstung für die Streuung in Abb. 1, rechts verantwortlich sein kann. Auch und besonders die Differenz der Geräte hinsichtlich Kapillarität sowie der unterschiedliche Standardisierungsgrad der gesamten Versuchsdurchführung dürften für die Streuung und die generell höheren Werte gemäß Enslin im Vergleich zu  $Enslin-Neff_{mod}$  verantwortlich sein.

## 4.2 Methodischer Vergleich Enslin-Neff<sub>mod</sub>\_Pulver / Enslin-Neff<sub>mod</sub>\_Presspille

Bei Gegenüberstellung der Wasseraufnahmen von Pulverkegeln mit jenen von Presspillen der gleichen Einwaagen (s. Abb. 8) zeigen sich auf Grund geringerer Porenräume und Kapillarität einerseits niedrigere Werte bei Presspillen (Reduktion um durchschnittlich etwa 50 % der Wasseraufnahmen von Pulvern). Andererseits liegt trotz gleicher Versuchsdurchführung, aber auf Grund unterschiedlicher Probenaufbereitung eine deutliche Streuung der Werte um die Regressionsgerade vor (daher nur mittelmäßige Korrelation). Dies bestätigt die Annahme, dass die Wasseraufnahmen von Presspillen eine andere Aussagekraft besitzen als die von Pulvern und lässt als Ursache vermuten, dass die Schüttdichte von bestimmten Materialien zu- falls- oder materialbedingt unterschiedlich ist.

So zeigt sich in Abb. 8, rechts, dass die Basalte (dunkle Signatur) die geringste Reduktion der Wasseraufnahme in Pillenform erfahren haben. Das spricht für die Beobachtung, dass die Basalte die kleinsten und dichtesten Schüttkegel aufwiesen und daher die Reduktion der Porenräume beim Herstellen der Pillen nur mehr vergleichsweise gering war. Entsprechend nahm auch die Wasseraufnahme nur relativ geringfügig ab.

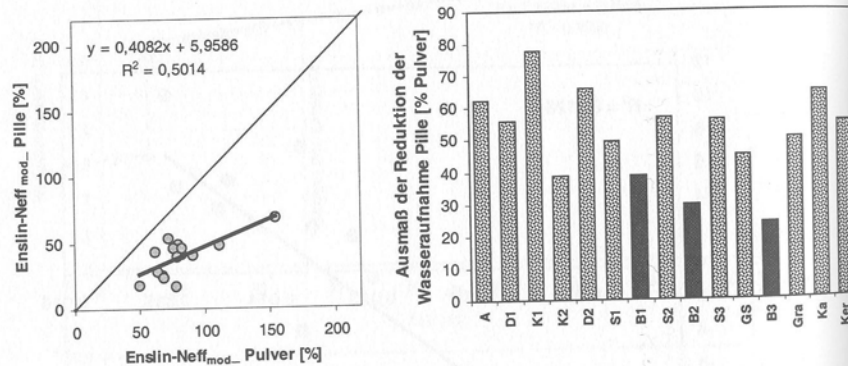


Abb. 8: Links: Gegenüberstellung der Wasseraufnahmen von Pulvern und Presspillen, rechts: Prozentuelle Reduktion der Wasseraufnahmen bei Presspillen im Vergleich zu Pulvern. Die Basalte (dunkle Signatur) zeigen die geringsten Unterschiede.

## 4.3 Vergleich der Aussagekraft der Methoden

Auf Grund der unterschiedlichen Geräte, Versuchsdurchführungen und Probenaufbereitungen ist mit unterschiedlicher Aussagekraft bzw. unterschiedlich hohen Zusammenhängen der nach verschiedenen Methoden ermittelten Wasseraufnahmen mit den Ergebnissen von Versuchen ähnlicher Aussage zu rechnen.

Dies zeigen deutlich Abb. 9 und Abb. 10. Bei Gegenüberstellung der verschiedenen Wasseraufnahmen lässt sich zunächst der klare Trend erkennen, dass die Streuung der Werte bei der Versuchsdurchführung nach RVS 11.062 (1997) an Hand eines Enslin-Gerätes am größten ist bzw. die Zusammenhänge am geringsten sind.

Gleichzeitig fallen einerseits 2 Proben auf, welche die bei weitem höchsten Wasseraufnahmen nach Enslin zeigen, gleichzeitig aber z.B. bei der Wasseradsorption nur im Mittelfeld rangieren, andererseits fallen drei Proben mit den höchsten Wasseradsorptionen bei gleichzeitig mittleren Wasseraufnahmen auf (s. Abb. 9). Bei diesen Proben handelt es sich um petrologisch und genetisch vergleichbare Proben. Im ersten Fall sind es penninische Serpentine, die bereits bei der Versuchsdurchführung der Wasseraufnahmen im Vergleich zu den anderen Materialien überdimensionale Schüttkegel aufwiesen. Bei gleicher Einwaage bedeutet dies, dass geringere Lagerungsdichten bzw. größere Porenvolumina vorliegen mussten. Im anderen Fall handelt es sich um die drei untersuchten Basalte, welche wiederum die geringsten Schüttkegel aufwiesen. Dies ist auf eine außerordentliche Dichtlagerung zurückzuführen, die bereits bei Siebanalysen auffiel. Der Grund für die unterschiedlichen Schüttdichten könnte materialspezifisch sein (z.B. geringere Dichtlagerung durch faserig-sperriges Gefüge von Chrysotilmineralen in Serpentiniten) oder in zufälligen Unterschieden in der Aufbereitung (z.B. Gefrietrocknung) liegen. Allerdings könnten diese vermeintlich zufälligen Differenzen der Aufbereitung ebenfalls auf bestimmte Materialcharakteristika zurückzuführen sein.

Bei Anwendung von Enslin-Neff<sub>mod</sub> verringert sich nun die Streuung und auch die Abweichung dieser beiden Serpentine und der Basalte von den anderen Materialien. Das ist wahrscheinlich auf die besser standardisierten und konstanteren Versuchsbedingungen und die verbesserte Verdunstungskorrektur zurückzuführen.

Bei Versuchsdurchführung nach Enslin-Neff<sub>mod</sub> unter Anwendung von Presspillen verringert sich die Streuung noch weiter, sodass eine klare Tendenz bei durchaus guter Signifikanz hinsichtlich der Ergebnisse anderer Versuche mit ähnlicher Aussage erkennbar wird.

Daraus wird ersichtlich, dass offenbar materialspezifische Unterschiede (Schüttdichten) durch die Verwendung von Presspillen nivelliert werden können. Dies kommt auch in Abb. 11 zum Ausdruck, wo wie in Abb. 9 die Wasserdampfadsorptionen mit den Wasseraufnahmen korreliert wurden, allerdings unter Ausklammerung der sich auffällig differenziert verhaltenden Basalte und penninischen Serpentine. Auch hier zeigt sich eine stetige Verbesserung der Korrelationen bzw. eine Verringerung der Streuung von Enslin bis hin zur Verwendung der Presspillen. Die Regression von den Presspillen weist darüberhinaus hinsichtlich ihrer Steigung die geringste Abweichung von der Regression bei Betrachtung sämtlicher Materialien auf (vgl. Abb. 9).

Daraus kann abgeleitet werden, dass Material(gruppen)-spezifische Unterschiede in der Lagerungsdichte der Schüttkegel bei Verwendung von Presspillen stark verringert werden. Unter Umständen ist es sogar nur dadurch möglich, die Wasseraufnahmen verschiedener Materialien miteinander seriös zu vergleichen. Bei Verwendung von Pulvern scheint es umso mehr erforderlich zu sein, nach Materialgruppen zu differenzieren, um so signifikante Zusammenhänge mit den Ergebnissen anderer Versuche zu erhalten.

Die Ergebnisse der Presspillen zeigen schließlich tatsächlich am besten die erwarteten Pauschal-Zusammenhänge (für alle Materialien ist eine einzige Regression anwendbar). Die Wasseraufnahmen der untersuchten Materialien korrelieren mit Wasserdampf- und Methylblauadsorption, aber auch (in eingeschränktem Maß) mit KAK (Cu-Komplex) und der spezifischen Oberflächenladung (obwohl diese nur an der Tonfraktion < 0,002 mm bestimmt wurde).

Aber auch bei Verwendung von Presspillen dürften bei materialspezifischen Gegenüberstellungen noch vertrauenswürdiger Zusammenhänge mit den Ergebnissen anderer Versuche zu

erwarten sein. Z.B. zeigt sich bei Gegenüberstellung der Wasserdampfadsorptionen mit den Wasseraufnahmen für die Materialgruppe der genetisch eng verwandten Basalte und Diabase in Abb. 11, dass eventuell erst bei Presspillen Zusammenhänge erkennbar werden und es tatsächlich Sinn machen könnte, auch bei Presspillen Materialgruppen zu differenzieren (s. sehr hohe Korrelation und deutlich stärkere Steigung im Vergleich zu Abb. 9). Da die untersuchten, offenbar locker gelagerten Diabase eine weit stärkere Reduktion der Wasseraufnahme bei Presspillen aufweisen als die Basalte (s. Abb. 8, rechts) kann erst nach Herstellen von Presslingen und damit Nivellierung der unterschiedlichen Schüttdichten ein (vermutlich) Materialgruppen-spezifischer Zusammenhang z.B. zur Wasserdampfadsorption hergestellt werden.

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aus den methodischen Vergleichen und den Gegenüberstellungen der Wasseraufnahmen mit Versuchen ähnlicher Aussagen lassen sich zusammenfassend folgende Schlüsse ziehen:

### 5.1 Methodischer Vergleich Enslin / Enslin-Neff<sub>mod</sub>

- Die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen nach der Methode Enslin-Neff<sub>mod</sub> ist an gleichen Enslin-Neff-Geräten sehr hoch, die relativen Abweichungen betragen in mittleren und hohen Wasseraufnahmebereichen deutlich < 2 %.
- Beim Vergleich der Werte nach Enslin-Neff<sub>mod</sub> mit Enslin zeigt sich, dass die Streuung der Ergebnisse um die lineare Regressionsgerade deutlich größer ist, als bei Gegenüberstellung zweier gleicher Geräte des Typs Enslin-Neff. Dies ist auf die in RVS 11.062 (1997) nicht vorgesehene Verdunstungskorrektur, vermutlich auch auf die unterschiedliche Sensibilität der kapillaren Wasseraufnahme der Geräte und auf den mangelhaften Standardisierungsgrad der gesamten Versuchsdurchführung gemäß RVS zurückzuführen.
- Die Durchführung einer Verdunstungskorrektur ist von grundsätzlicher Bedeutung für die Aussagekraft des Ergebnisses eines Wasseraufnahmeversuches. Bei Kalkulation der Verdunstung über gemittelte Leermessungen mussten die Wasserverbrauchswerte der untersuchten Proben um durchschnittlich 9 % reduziert werden.
- Eine Verdunstungskorrektur verschiedener Proben über einen pauschalen Mittelwert sowie die Nicht-Berücksichtigung des Einflusses der während des Versuches auf der Fritte befindlichen Probe kann im Vergleich zu einer probenspezifischen Verdunstungskorrektur eine relative Abweichung der Wasseraufnahme von einigen M.-% Trockensubstanz bedeuten.
- Vor allem aber tritt bei Werten nach Enslin im Vergleich zu Enslin-Neff<sub>mod</sub> eine (grundsätzlich kapillar bedingte) Erhöhung der Wasseraufnahmen ein. Diese ist darüberhinaus nicht-linear (überproportional) und beträgt im Rahmen der untersuchten Proben mit Wasseraufnahmen von 50 M.-% (nach Enslin-Neff<sub>mod</sub>) 21 % und bei bei Proben mit 250 % bereits 41 % im Vergleich zu Enslin-Neff<sub>mod</sub>. Eine über Leermessungen durchgeführte angenäherte Verdunstungskorrektur verringert die Differenzen geringfügig (in Abhängigkeit der Wasseraufnahmefähigkeit eines Materials). Eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Methoden ist daher weder in absoluter, noch in relativer Hinsicht (also der Proben zueinander) gegeben.

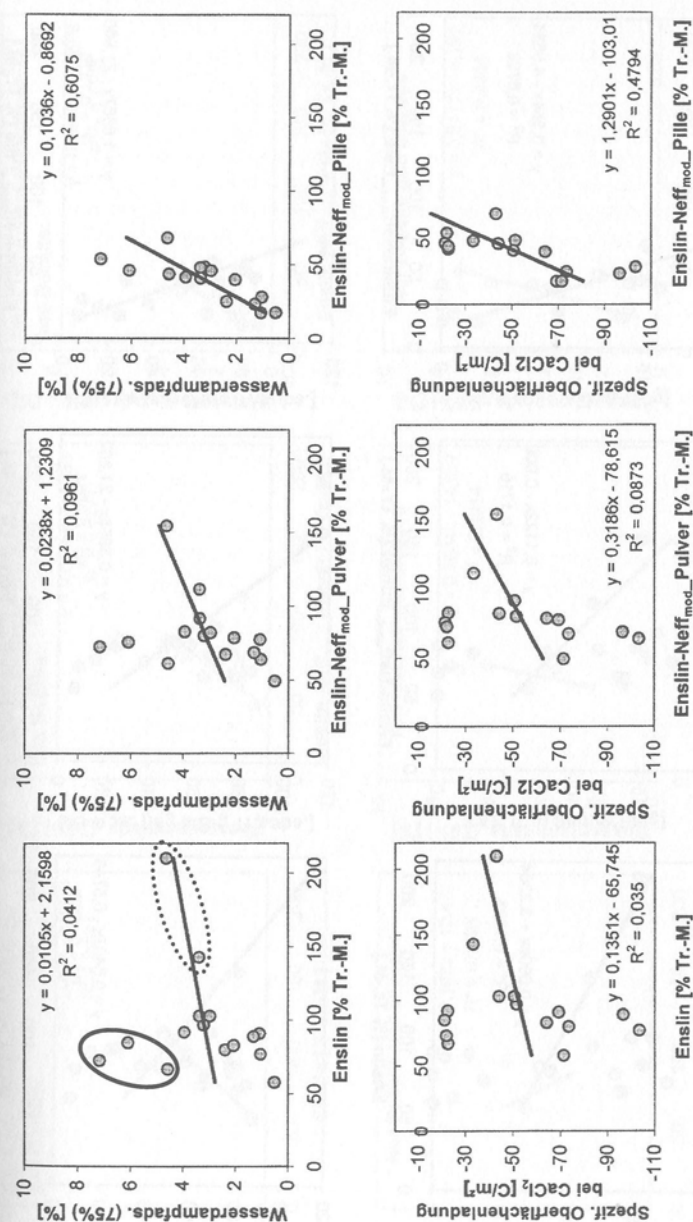


Abb. 9: Vergleich der Aussagekraft der verschiedenen Wasseraufnahme-Methoden durch Korrelation mit Wasserdampfadsorptionen und spezifischen Oberflächenladungen der Proben. Durchgezogen umrahmte Gesteine = Basalte, punktiert umrahmt = penninische Serpentinite.



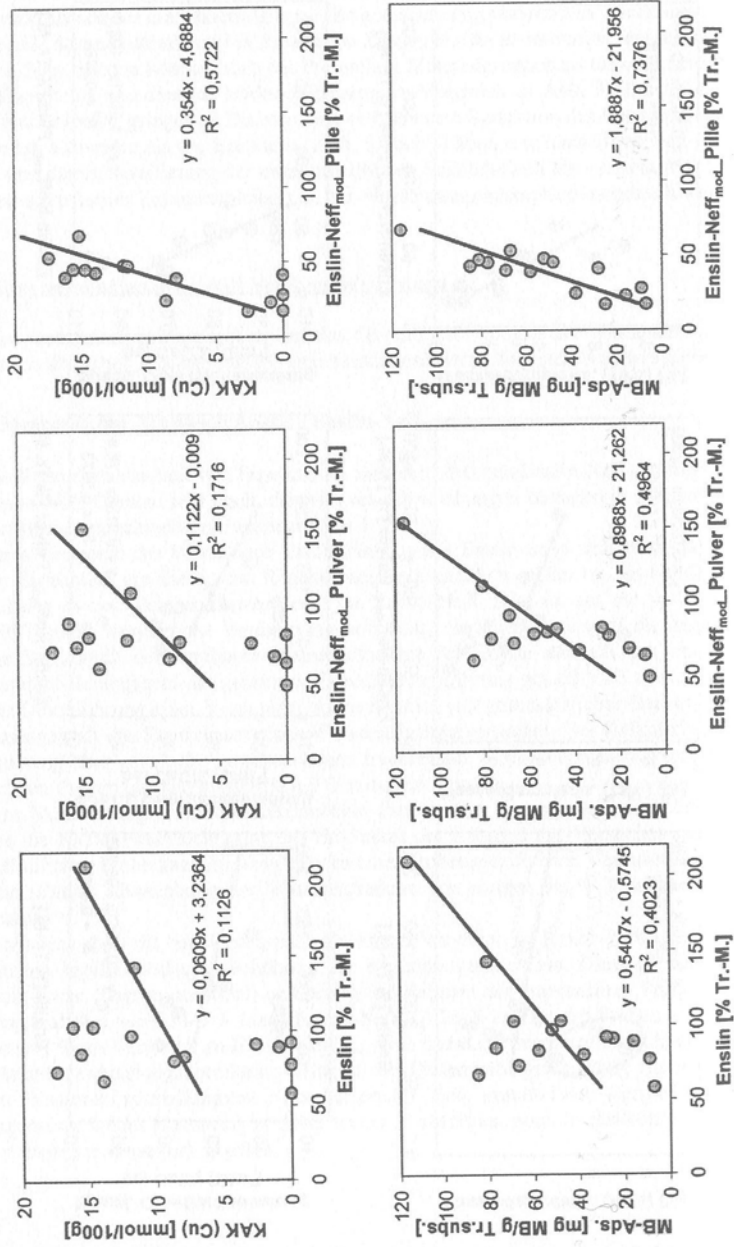


Abb. 10: Vergleich der Aussagekraft der verschiedenen Wasseraufnahme-Methoden durch Korrelation mit der Kationenaustauschkapazität (Cu-Komplex) und der MB-Adsorption.

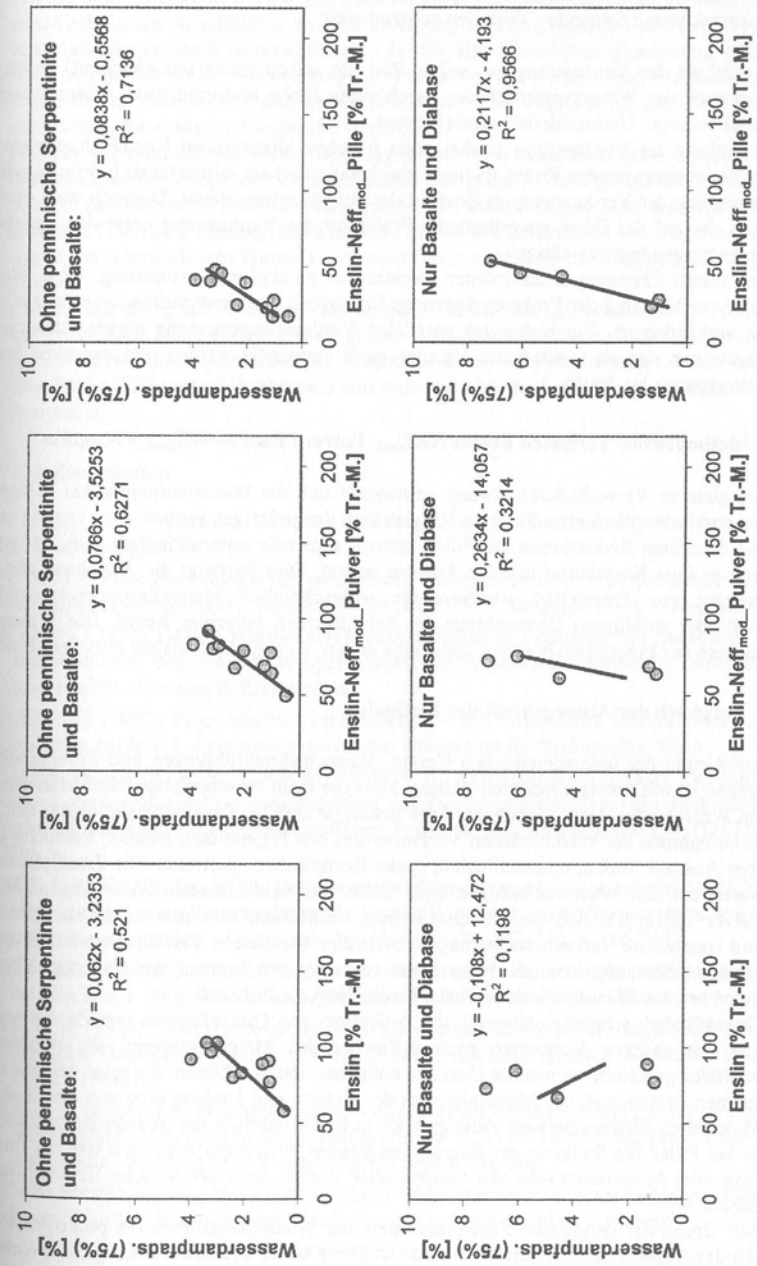


Abb. 11: Vergleich der Aussagekraft der verschiedenen Wasseraufnahme-Methoden durch Korrelation mit Wasserdampfadsorptionen bei bestimmten Materialgruppen.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung nach Enslin-Neff<sub>mod</sub> wurde eine modifizierte Verdunstungskorrektur mit folgenden Vorteilen ausgearbeitet:

- Ermittlung der Verdunstung zur selben Zeit am selben (nicht nur gleichen!) Gerät, mit dem auch der Wasserverbrauch der zugehörigen Probe bestimmt wird. Dadurch werden gerätebedingte Unterschiede ausgeschlossen.
- Ermittlung der Verdunstung zu den exakt gleichen klimatischen Raumbedingungen wie bei der entsprechenden Probe, da diese gleichzeitig und am selben Gerät bestimmt wird.
- Ermittlung der Verdunstung im Zustand der aufgebrachten Probe. Dadurch wird der Einfluss der auf der Fritte ausgebreiteten Probe auf die Verdunstung unter den gegebenen Bedingungen berücksichtigt.
- Besonders: Ersparnis eines zweiten Gerätes zur parallelen Leermessung, bzw. Wegfall einer zur Messung der Probe ergänzenden Ermittlung der Verdunstung, wenn nur ein Gerät vorhanden ist. Ein bisher zur parallelen Verdunstungsmessung eingesetztes zweites Gerät kann nun als zusätzliches Versuchsgerät verwendet werden (bei mehreren Proben Zeitersparnis bis 50 %).

### 5.2 Methodischer Vergleich Enslin-Neff<sub>mod</sub>\_Pulver / Enslin-Neff<sub>mod</sub>\_Presspille

- Bei gleicher Versuchsdurchführung verringerte sich die Wasseraufnahme bei Presspillen um durchschnittlich etwa 50 % im Vergleich zu den pulvrigen Proben.
- Die einzelnen Reduktionen bei Pillen können aber sehr unterschiedlich sein, sodass nur eine mäßige Korrelation mit den Pulvern auftrat. Dies bestätigt die Annahme, die Herstellung von Presspillen nivelliert die wahrscheinlich Materialgruppen-spezifischen (und/oder zufälligen) Unterschiede der Schüttdichten pulvriger Kegel. Die Wasseraufnahmen der Presspillen besitzen daher eine andere Aussagekraft als die pulvriger Proben.

### 5.3 Vergleich der Aussagekraft der Methoden

- Auf Grund der unterschiedlichen Geräte, Versuchsdurchführungen und Probenaufbereitungen ist mit unterschiedlicher Aussagekraft der nach verschiedenen Methoden ermittelten Wasseraufnahmen zu rechnen. Dies bestätigte sich bei Gegenüberstellungen der Wasseraufnahmen der verschiedenen Verfahren mit den Ergebnissen anderer Versuche ähnlicher Aussage, indem unterschiedlich starke Korrelationen auftraten. Die Zusammenhänge waren bei den Wasseraufnahmen nach Enslin am schlechtesten. Nach Enslin-Neff<sub>mod</sub>\_Pulver verringerte sich die Streuung immer, wahrscheinlich durch besser standardisierte und konstantere Versuchsbedingungen sowie eine spezifische Verdunstungskorrektur. Die geringste Streuung bzw. die beste Korrelation mit den Ergebnissen ähnlicher Versuche traten bei den Wasseraufnahmen nach Enslin-Neff<sub>mod</sub>\_Pille auf.
- Grundsätzlich scheint es sinnvoll, das Aufspüren und Quantifizieren von Zusammenhängen mit anderen Versuchen nach differenzierten Materialgruppen, die petrologisch und/oder genetisch verwandte Gesteine enthalten, durchzuführen. So zeigt bei den untersuchten Proben z.B. die Materialgruppe der Basalte und Diabase eine von den restlichen Materialien differenzierbare Aussagekraft (z.B. hinsichtlich der Wasserdampfadsorption ist bei Pillen die Steigung der Regressionsgeraden etwa doppelt so groß wie bei Betrachtung aller Materialien oder der Gruppe aller Proben ohne penninische Serpentine und Basalte).
- Auf Grund der geringeren Zusammenhänge der Wasseraufnahmen bei pulvrigen Proben mit den Ergebnissen ähnlicher Versuche ist hier eine für alle Materialien gültige pauschale Regression kaum möglich. Besonders bei pulvrigen Proben scheint eine Differenzierung von Materialgruppen hinsichtlich der Quantifizierung von Zusammenhängen sinnvoll. Bei

Einsatz von Presspillen werden die materialspezifisch (und/oder zufällig) bedingten Unterschiede in der Schüttdichte so weit nivelliert, dass Regressionen mit zum Teil guten Korrelationen ermittelt werden können, die für alle Materialien gleichzeitig gültig sein können. Dadurch ist bei Verwendung von Presspillen am ehesten eine vergleichbare Aussagekraft der einzelnen Wasseraufnahmen, bzw. eine Vergleichbarkeit der Werte verschiedener Materialien untereinander gegeben.

- Nur bei Verwendung von Presspillen zeigten sich also tatsächlich die erwarteten signifikanten Zusammenhänge zu den Ergebnissen der anderen durchgeführten Versuche, besonders zu MB- und Wasserdampfadsorption. Ein mittelmäßiger Zusammenhang zur spezifischen Oberflächenladung, die allerdings nur an der Teilfraktion < 0,002 mm bestimmt wurde, ist (ebenfalls) ein Hinweis auf einen (noch zu differenzierenden) mineralogischen Einfluss.
- Die Untersuchung der Wasseraufnahme nach Enslin-Neff<sub>mod</sub>, besonders in Anwendung auf Presspillen, scheint nach diesen ersten Versuchsreihen methodisch sehr geeignet zu sein, weitere Einflussparameter der Wasseraufnahme wie Mahlfeinheit, Kornverteilung, Oberfläche (Körner und Prüfkörper) und besonders Mineralgehalte auf deren Relevanz zu überprüfen.

## 6 Quellenangaben

- DIN 18132 (1995): Baugrund. Versuche und Versuchsgeräte. Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens.
- DIN 66131 (1993): Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmett, Teller (BET). 5 S.. Deutsches Inst. f. Normung.
- DIN EN ISO 12571 (2000): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.
- KUGLER, H. (2002): Frostsicherheit im Straßenbau – ein verbessertes Mineralkriterium. Dissertation am Inst. f. Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien.
- KUGLER, H., OTTNER, F., SCHWAIGHOFER, B., STRASSER, W. (2002): Der Einfluss von Tonmineralen auf die Frostsicherheit von Straßenbaugesteinen – ein modifiziertes Mineralkriterium. Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe e.V. (DTTG), Bd. 9.
- MEIER, L.P., KAHR, G. (1999): Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine. - Clays and Clay Minerals, Vol. 47, No. 3, 386-388.
- MEISSNER, M. (2002): Oberflächenpotential von Bruchgesteinen im Straßenbau. Diplomarbeit am Inst. f. Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien.
- NEFF, H.K. (1959): Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslingerätes. Bautechnik 39, H. 11, S. 415-421.
- NEFF, H.K. (1988): Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte. – Bautechnik 65. S. 153 – 163. Verlag Ernst + Sohn für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.
- ÖNORM EN 933-9 (Feb. 1999): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 9: Beurteilung von Feinanteilen, Methylenblau-Verfahren.
- RVS 11.062 (1997): Grundlagen, Prüfverfahren, Steinmaterial. - Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten.