

# **Der Wasseraufnahmeversuch nach ENSLIN-NEFF in der erd- und grundbautechnischen Praxis**

Dipl.-Ing. Hermann K. Neff  
ETN Erdbaulaboratorium Tropp-Neff und Partner  
D-35410 Hungen/Oberhessen

Beitrag  
5. Österreichische Geotechniktagung  
21.02. und 22.02. 2005  
Wien

## **KURZFASSUNG**

Status-Beitrag zur Anwendung des Wasseraufnahmeversuchs als Routine-Versuch nach ENSLIN-NEFF zur bodenphysikalischen Beurteilung der tonmineralogisch bedingten plastischen Eigenschaften der bindigen Bodenarten. Schwerpunkt bilden die Zusammenhänge des Wasseraufnahme-Indexwertes mit den bodenphysikalischen Kennwerten und bodenmechanischen Parametern in der langjährigen Labor- und Baustellenpraxis sowie deren Nutzenanwendung bei der Qualitätslenkung und –sicherung mit Parameter-Tabellen.

# Inhalt

## 1. BODENPHYSIKALISCHER KENNWERT WASSERAUFNAHME $W_A$

- 1.1. Routineuntersuchungen nach ENSLIN-NEFF
- 1.2. Proben-Pulverisierung, Verdunstung und Versuchsdauer
  - 1.2.1. Proben-Pulverisierung
  - 1.2.2. Verdunstung und Versuchsdauer  $T = 4$  Minuten
- 1.3. Wasseraufnahme  $W_A$  als Index-Kennwert für die Bodengruppen nach DIN 18 196
- 1.4. Wasserbindegrad  $W_{bg}$  als Index-Kennwert für die Konsistenz

## 2. WASSERAUFNAHME-KENNWERTE UND BODENMECHANISCHE PARAMETER

- 2.1. Verdichtung im Proctorversuch
  - 2.1.1. Fließgrenzen-Vergleichsversuche BJERRUM 1952 und NEFF 1959 [7]
  - 2.1.2. Wasseraufnahme und Proctorversuchs-Kennwerte
- 2.2. Frosthebung, Schrumpfen und Quellen
  - 2.2.1. Frosthebung
  - 2.2.2. Schrumpfen und Quellen
- 2.3. Zeitsetzung und Zusammendrückung im Kompressionsversuch
- 2.4. Reibungswinkel und Kohäsion im Rahmen-Scherversuch
- 2.5. Durchlässigkeit im 3-achsial-Versuch ( $i=30$ )

## 3. BODENPHYSIKALISCH/BODENMECHANISCH GEORDNETE PARAMETERTABELLEN

## 4. SCHLUSSBEMERKUNG

## 1. BODENPHYSIKALISCHER KENNWERT WASSERAUFNAHME $W_A$

Sowohl für die Kennwerte der plastischen Eigenschaften als auch für die Parameter des bodenmechanischen Verhaltens bindiger Böden sind deren tonmineralogisch bedingten Eigenschaften maßgebend. Diese werden durch die Art und Größe des Massenanteils der im Boden enthaltenen Tonmaterialien bestimmt.

Zur vereinfachten Kennzeichnung dieses tonmineralogisch bedingten plastischen Verhaltens wurden die in der landwirtschaftlichen Bodenklassifikation von ATTERBERG (1912) eingeführten Plastizitätsgrenzen von TERZAGHI 1925 [1] in die „Erdbaumechnik“ übernommen. Das Plastizitätsdiagramm von A. CASAGRANDE [u. a. 5] ist inzwischen die international eingeführte Grundlage der nationalen Normungen in der Geotechnik. Das Diagramm deckt den Bodenbereich der Fließgrenze zwischen  $W_L = 25\%$  und  $80\%$  sowie die Plastizitätszahlen  $I_p > 4\%$  ab.

Parallel zu dieser Entwicklung ist in den 30er Jahren im Zusammenhang mit dem deutschen Autobahnbau von einer Forschergruppe aus Bodenmechanikern und Tonmineralogen das ursprünglich von ENSLIN 1933 [2] für die technische Keramik entwickelte Wasseraufnahmegesetz (Abb. 1 a) für die Untersuchung von bodenähnlichen Bentonit-Quarzmehl-Gemischen verwendet worden (Abb. 2). In den tonmineralogischen, bodenphysikalischen und bodenmechanischen Grundlagenforschungen wurde von ENDELL, LOOS, BRETH 1939 [3] nachgewiesen, dass bei anorganischen bindigen Böden der Kennwert Wasseraufnahme mit dem Kennwert Fließgrenze vergleichbare Aussagen zulässt.

Über den Stand der Ergebnisse dieser Grundlagenforschung ist kriegsbedingt zuletzt 1941 von ENDELL [4] umfassend berichtet worden (Abb. 3). Hiermit steht dem Bodenmechaniker bodenphysikalisch ein unmittelbarer Bezug zu den tonmineralogischen Ursachen der plastischen Eigenschaften bindiger Böden zur Verfügung.

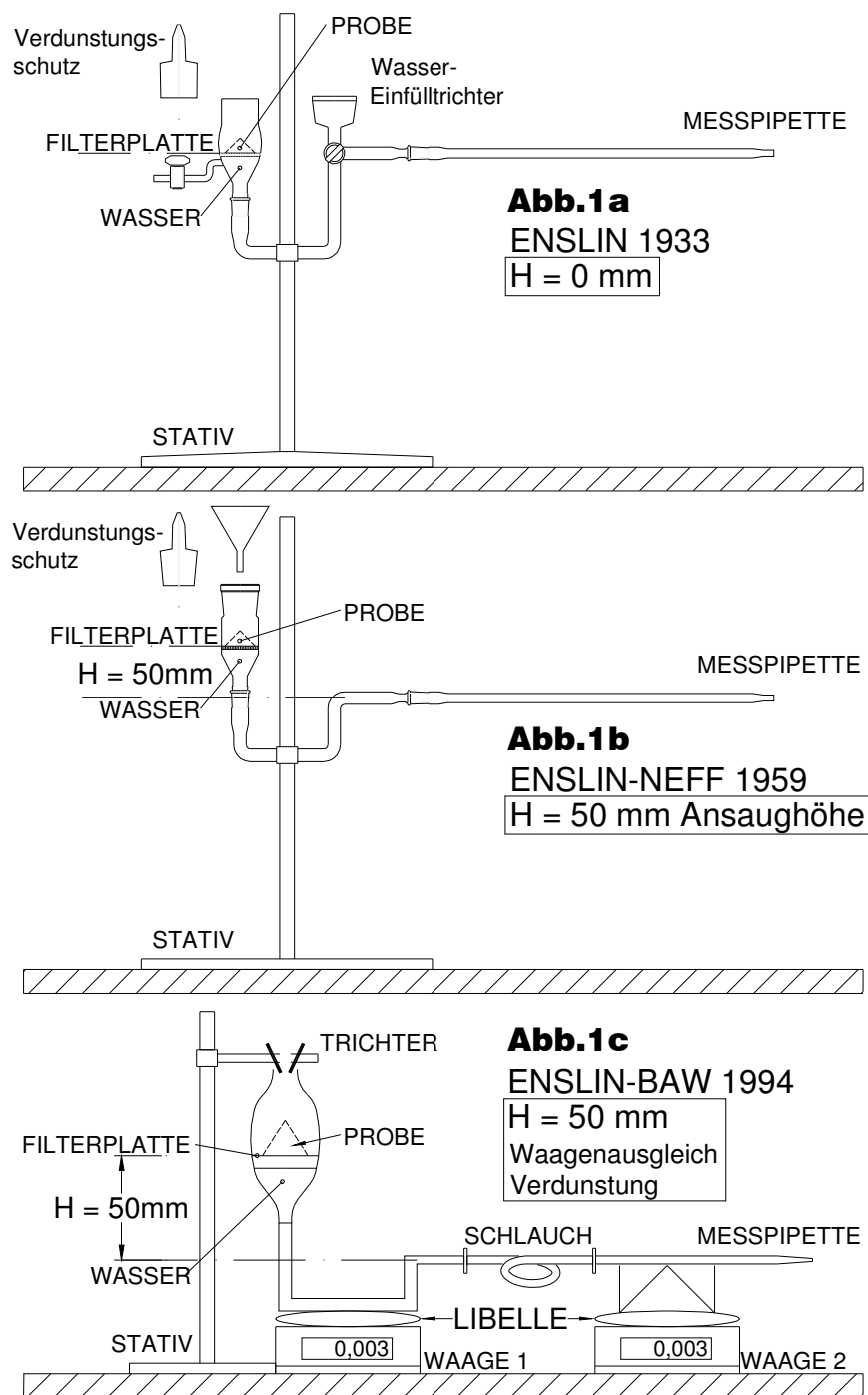


Abb. 1: Messgeräte Wasseraufnahme-Versuch  
ENSLIN 1933, ENSLIN-NEFF 1959/2005, ENSLIN-BAW 1994

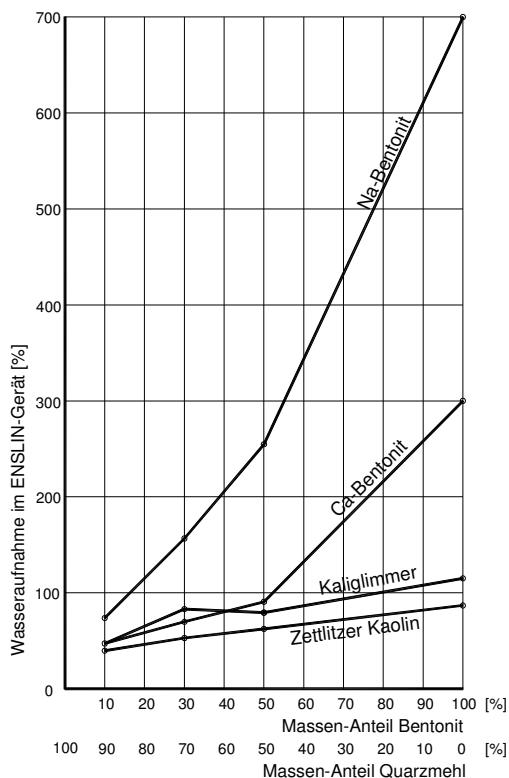


Abb. 2: Wasseraufnahme ENSLIN von Bentonit-Quarzmehl nach ENDELL, LOOS, BRETH (1939)

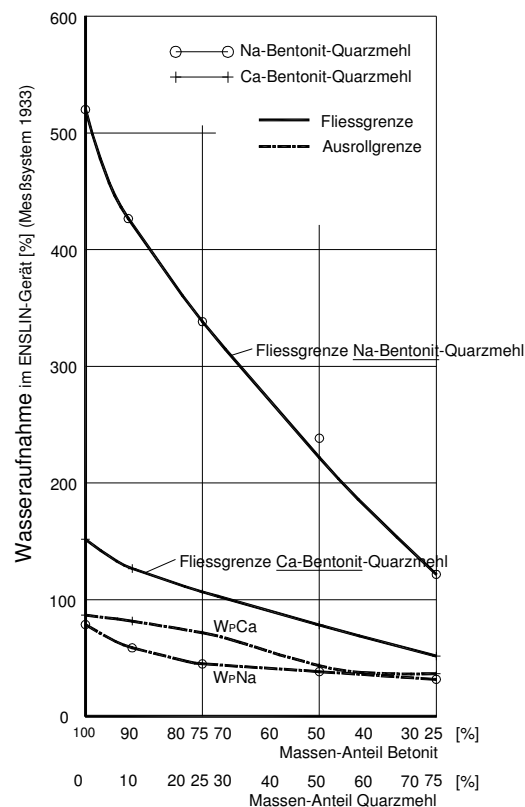


Abb. 3: Wasseraufnahme ENSLIN und Plastizitätsgrenzen von Bentonit-Quarzmehl nach ENDELL (1941)

### 1.1. Routineuntersuchungen nach ENSLIN-NEFF

Durch die Grundlagenforschung mit dem ENSLIN-Gerät von 1933 wurde das Schlammkorn von 0 bis 0,06 mm, d. h. der Ton-Schluff-Bereich erfasst. Vielfach sind jedoch bei bindigen Böden Beimengungen von Siebkorn bis 2 mm vorhanden. Für die praktische Anwendung war es deshalb erforderlich, den Anwendungsbereich auf 0 bis 2 mm auszudehnen und vorrangig für die Versuchsroutine mit Wasseraufnahmen  $W_A < 100\%$  eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu erreichen. Dies wurde mit dem ENSLIN-NEFF-Gerät aufgrund der Forschungsarbeiten des Verfassers (1955 bis 1958) erreicht. Dazu wurde die Probenmenge von 0,3 g auf 1,0 g vergro遖ert und die Ansaughöhe der Filterplatte von 0 auf 50 mm erhöhet (Abb. 1 b). Die Forschungsergebnisse wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Grundbau der TH Darmstadt (Leitung: O. Prof. Dipl.-Ing. W. DETIG) bereits ab 1957/1958 in der Zweckforschung routinema遡ig eingesetzt. Somit konnte der ENSLIN-NEFF-Versuch ab 1959 [7] praxisreif im ETN Erdbaulaboratorium Dr. TROPP - Dipl.-Ing. NEFF (jetzt: ETN Erdbaulaboratorium TROPP-NEFF und Partner) zum Einsatz kommen.

Im Vergleich mit den Fließgrenzen- und Ausrollgrenzen-Versuchen für Einzelprojekte wurde so der Wasseraufnahme-Versuch als Routineversuch mit stets größerer Stichprobenzahl die Kontrolle von Homogenbereichen möglich.

Das Messgerät der Wasseraufnahme nach ENSLIN-NEFF (1959 u. 1988) entspricht im Übrigen den Abmessungen der DIN 18 132 und wird weiterhin eingesetzt.

## **1.2. Proben-Pulverisierung, Verdunstung und Versuchsdauer**

### **1.2.1. Proben-Pulverisierung**

Um 1965 wurde im ETN von der manuellen Pulverisierung auf eine maschinelle Pulverisierung übergegangen. Anhand von Reihenuntersuchungen wurde dazu der Pistill-Andruck auf 75 % des Maximaldrucks (Gerät Fa. FRITSCH, Idar-Oberstein) und die Dauer auf 10 min begrenzt, da mit zunehmendem Druck und Dauer der Pulverisierung der Sandanteil durch Abrieb verfeinert und so die Wasseraufnahme dieser Routineuntersuchungen in geringen Umfang erhöht wird [7].

Dies wird im Prinzip durch Vergleichsuntersuchungen der BAW Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe 1994 [13] bestätigt und muss bei Ring-Analysen durch einheitliche Vorgaben der Pulverisierung berücksichtigt werden.

### **1.2.2. Verdunstung und Versuchsdauer $T = 4$ Minuten**

Nach NEFF (1959) war für rel. kurze Versuchszeiten von 4 Minuten der Einfluss der Wasserverdunstung auf das Versuchsergebnis als vernachlässigbar klein beurteilt worden. Die eingehenden Untersuchungen mit dem aufwendigeren ENSLIN-BAW-Gerät 1994 [13], das den Verdunstungsfehler für jede Versuchsdauer ausschließt (vgl. Abb. 1 c), belegen mit Abb. 4 den bei einer Versuchsdauer von 4 Minuten für Wiederholversuche weiterhin vernachlässigbaren Verdunstungseinfluss.

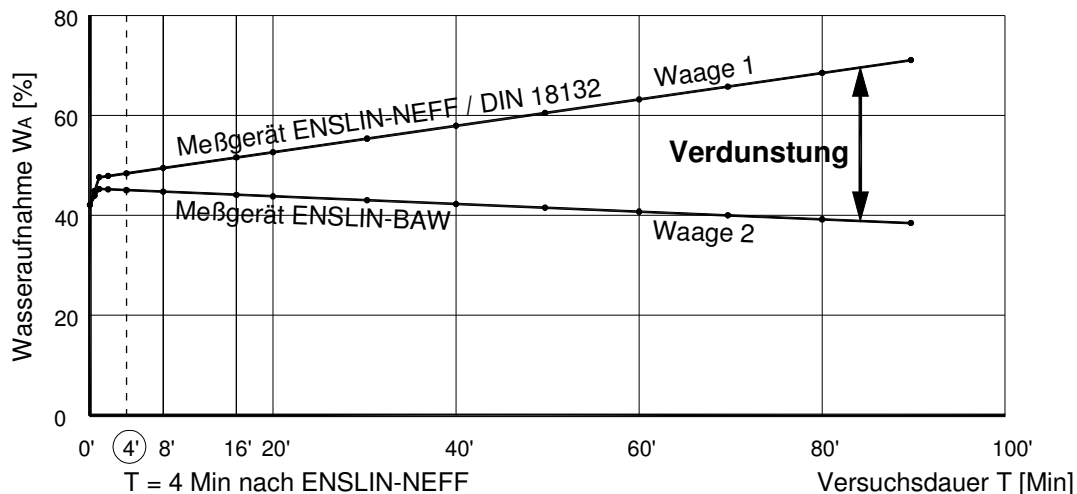


Abb. 4: Wasser-Verdunstung und Versuchsdauer Gerät ENSLIN-NEFF ( $T = 4$  min) im Vergleich mit Gerät ENSLIN-BAW nach Laborbericht 011 BAW Karlsruhe (1994)

Auch die neuesten auf der 4. Österreichischen Geotechnik-Tagung von der Forschergruppe KUGLER, SCHWAIGHOFER, GRUBER 2003 [16] sowie die von DIENG 2005 [17] in der BAUTECHNIK vorgestellten Versuche bestätigen unter aufwendigen Versuchsbedingungen den bei 4 min Dauer geringen Verdunstungseinfluss.

Für Forschungsuntersuchungen mit Bentonit-Wasseraufnahmen  $W_A > 200$  % und eine Versuchsdauer  $> 24$  Stunden erscheint die Verwendung des ENSLIN-BAW-Gerätes mit der getrennten automatischen Messung des Verdunstungsanteils und damit des echten Wasseraufnahmeanteils besonders geeignet. Diese Versuchsart ist für die Wasseraufnahme-Norm DIN 18 132, als Normativer Verweis Nr. 3 zu empfehlen.

Bei Routineuntersuchungen nach ENSLIN-NEFF für Wasseraufnahmen von kurzer Dauer, insbesondere  $T = 4$  min, ist somit weder eine Verdunstungsschutzhaube noch ein Parallelgerät zur Verdunstungskontrolle erforderlich. Dies gestattet in der Praxis eine vereinfachte Versuchsroutine, die zur Kontrolle der Einzelversuche stets Wiederholungen, ohne großen Aufwand sowie eine größere Stichprobenzahl aus den Bodenschichten erlaubt [8].

### 1.3. Wasseraufnahme $W_A$ als Index-Kennwert für die Bodengruppen nach DIN 18 196

Im Beiblatt 1 zur Neufassung der DIN 4020 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke“ (2003) werden in Zeile 1 und 2 der Tabelle 7 „Laborversuche an Bodenproben“ die Korngrößenverteilung und die Plastizitätsgrenzen für fein- und gemischtkörnige Böden als Grundlage für die Bodenklassifizierung angegeben. In Zeile 3 folgt der Wasseraufnahmeversuch nach DIN 18 132. Danach ist die Kenngröße „Wasseraufnahmevermögen“ als Indexwert für die Klassifizierung sowie als Anhaltswert für die Plastizität und Aktivität zu verwenden. Mit der nach Abschnitt 1.2. standardisierten Versuchsdurchführung nach ENSLIN-NEFF gemäß Normativer Verweis Nr. 1 wird dazu der Korngrößenbereich bis 2 mm erfasst [8].

In Bezug auf DIN 18 196 „Erd- und Grundbau-Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke“, d. h. für die Einteilung in Bodengruppen mit „annähernd gleichem stofflichen Aufbau und ähnlichen bodenphysikalischen Eigenschaften“ gilt somit nach NEFF [8] folgende Zuordnung nach Tabelle 1:

Tab. 1: Zuordnung Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF (T = 4 min) zur Plastizität nach DIN 4022-1 und Bodengruppen nach DIN 18 196 nach NEFF (1959/2005)

Wasseraufnahme $W_A$ ENSLIN-NEFF [%]	Plastizität (DIN 4022-1)	Bodengruppe (DIN 18 196)
< 5	keine	SE - GE
5 bis 30		SE
30 bis 40	keine bis sehr geringe	SU, SU <sup>^</sup> , ST, ST <sup>^</sup>
40 bis 60	leicht plastisch	UL, TL
60 bis 85	mittel plastisch	UM, TM
85 bis 130	ausgeprägt plastisch	TA
> 130		TA



#### 1.4. Wasserbindegrad $W_{bg}$ als Index-Kennwert für die Konsistenz

Für jeden Wasseraufnahmeversuch wird eine Proben-Trocknung und damit Feststellung des Wassergehaltes erforderlich. In den Forschungsarbeiten der 30er Jahre war stets das tonmineralogisch bedingte Wasserbindevermögen der Tone hervorgehoben und nach NEFF (1959) und NEFF (1988) die Wasseraufnahme im ENSLIN-NEFF-Gerät als „Wasserbindevermögen  $W_b$ “ ( $W_b'$  bei 4 Minuten Versuchsdauer) bezeichnet worden. Dementsprechend wurde das Verhältnis des vorhandenen natürlichen Wassergehaltes zur maximalen Wasseraufnahme, d.h. dem „Wasserbindevermögen  $W_b$ “ mit „Wasserbindegrad  $W_{bg}$ “ bezeichnet und wird hier weiterhin beibehalten (Tab. 2).

Im Zuge der Versuchsnormung nach DIN 18 132 „Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens (1995) hat man sich an Stelle des Kennwert-Namens „Wasserbindevermögen“ auf „Wasseraufnahmevermögen“ geeinigt. Da der standardisierte ENSLIN-NEFF-Versuch [8] eine 45-jährige Versuchsdaten-Erfahrung repräsentiert, wird nunmehr zur Unterscheidung mit dem DIN-Versuch analog der Originalbezeichnung der 30er Jahre der Kennwert-Name „Wasseraufnahme  $W_A$ “ mit Angabe des Versuchsgerät-Namens verwendet.

Tab. 2: Zuordnung Wasserbindegrad  $W_{bg}$  zur Konsistenzansprache nach DIN 4022-1 und Konsistenz  $I_c$  nach DIN 18 122-1 nach NEFF (1959/2005)

Bereich Wasserbindegrad $W_{bg}$ [%]	Konsistenz-Bereich DIN 4022-1	Konsistenzzahl $I_c$ DIN 18 122-1
< 20	halbfest bis fest	> 1,0
20 bis 40	steif	1,0 bis 0,8
40 bis 50	steif bis weich	0,8 bis 0,7
50 bis 60	weich bis breiig	< 0,7 bis > 0,5

$$\text{Wasserbindegrad } W_{bg} = \frac{\text{naturlicher Wassergehalt}}{\text{Wasseraufnahme } W_A \text{ ENSLIN-NEFF}} \cdot 100 [\%]$$

Aus den parallel zu den Wasseraufnahmeversuchen stets durchgeführten Plastizitatsuntersuchungen, insbesondere den manuell Versuchen nach DIN 4022-1 „Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels“, sind in Tabelle 2 die Anhaltswerte zu den DIN-gemäßen Kon-

sistenzahlen  $I_C$  im Verhältnis zum Wasserbindegrad  $W_{bg}$  nach NEFF (1959) als Erfahrungswerte mitgeteilt. Für größere Baufelder sind entsprechende Plastizitätsgrenzen-Versuche zur Justierung der Tabellenwerte im Einzelfall zu empfehlen. Dies ergibt sich auch aus der Korrelation der Wasseraufnahme ENSLIN-BAW zur Fließ- und Ausrollgrenze gem. Abb. 5, die tonmineralogisch bedingt stets mit einer Streubreite der Versuchsergebnisse verbunden ist.

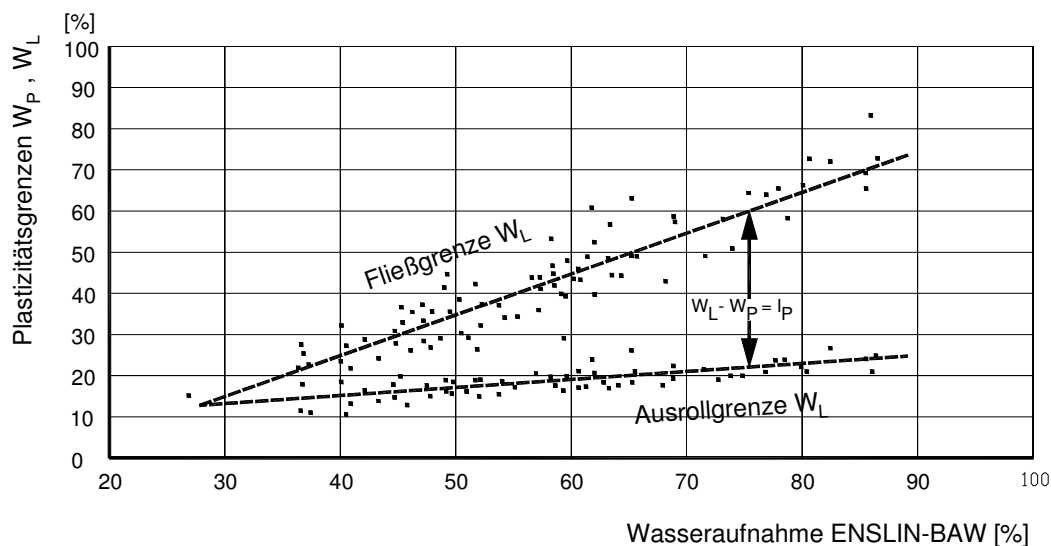


Abb. 5: Wasseraufnahme ENSLIN-BAW und Plastizitätsgrenzen nach Laborbericht 015 BAW Karlsruhe (1996)

## **2. WASSERAUFNAHME-KENNWERTE UND BODENMECHANISCHE PARAMETER**

In mehr als 5000 Einzelprojekten aller Größenordnungen von ETN wurden bis heute die nach NEFF (1988) aufgrund korrelativer Beziehungen fortgeschriebenen Zusammenhänge einer Einzelfallprüfung unterzogen, ohne dass eine grundsätzliche Änderung erforderlich wurde.

Das Datenmaterial erfasst geologisch gesehen die holozänen, pleistozänen und tertiären Lockergesteins-Ablagerungen des Rhein-Main-Gebietes (u. a. „Frankfurter Ton“), die Montmorillonit-reichen Verwitterungsdeckschichten des nordöstlich angrenzenden Vogelsberges, einem tertiären Vulkangebiet von rund 50 km Durchmesser, die Deckschichten des nordwestlich angrenzenden Rheinischen Schiefergebirges und der Münsterländer Kreidemulde, die Talauen des Niederrheins und der Ostseeküste nebst vielen Einzelobjekten im weiteren Gebiet der BRD. Auch die unterschiedlichsten geologischen und eiszeitlichen Vorbelastungen und Bodenbildungsbedingungen werden erfasst.

### **2.1. Verdichtung im Proctorversuch**

2.1.1. Fließgrenzen-Vergleichsversuche BJERRUM 1952 und NEFF 1959 [7]  
Schon BJERRUM (1952) hatte als Konsequenz der bodenphysikalischen Zusammenhänge die Beziehung zwischen der Fließgrenze und der optimalen Proctordichte sowie dem optimalen Wassergehalt ermittelt, wie in Abb. 6 a und 6 b dargestellt. Dieser Zusammenhang bestätigt analog Abb. 7 a und 7 b die Ergebnisse der o. a. Grundlagenforschung aus den 30er Jahren, wonach zwischen den bodenphysikalischen Kennwerten bindiger Böden und den bodenmechanischen Parametern eine bodenphysikalische Gesetzmäßigkeit besteht. Diese Beziehung ist grundsätzlicher Art und gilt entsprechend der Grundlagenforschung der 30er Jahre auch für den Wasseraufnahmeversuch.

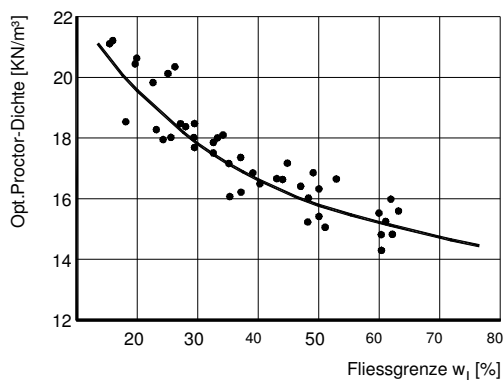


Abb.6a: Fließgrenze und Richtwerte Opt. Proctor-Dichte nach BJERRUM (1952)

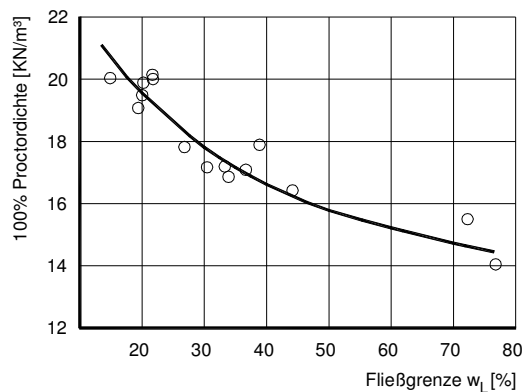


Abb.7a: Fließgrenze und Richtwerte Opt. Proctor-Dichte nach NEFF (1959/2005)

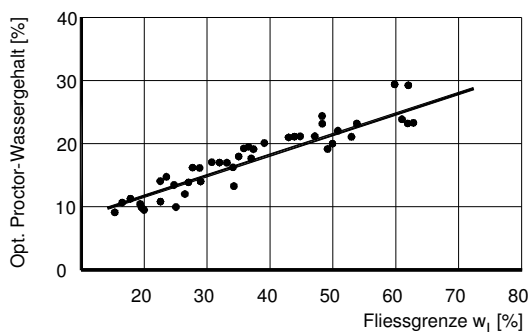


Abb.6b: Fließgrenze und Richtwerte Opt. Proctor-Wassergehalt nach BJERRUM (1952)

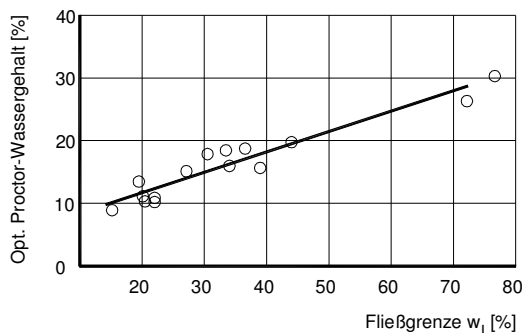


Abb.7b: Fließgrenze und Richtwerte Opt. Proctor-Wassergehalt nach NEFF (1959/2005)

### 2.1.2. Wasseraufnahme und Proctorversuchs-Kennwerte

In gleicher Weise lassen sich die Beziehungen der Wasseraufnahme zu den Verdichtungs-  
werten 100 % (Abb. 8 a u. 8 b) oder 97 % bzw. 95 % Proctordichte darstellen [7].

Unter Berücksichtigung von z. B. 2 % Wassergehaltstoleranz kann im Einzelfall sicher beur-  
teilt werden, ob eine im Erdbau zu verarbeitende Bodengruppe mit ihrem natürlichen Wasser-  
gehalt oberhalb des geforderten Proctorwassergehalts-Grenzwertes liegt und deshalb nur mit  
Zusatzmaßnahmen, ggf. Abtrocknung oder Kalkstabilisierung eingebaut werden kann. So  
werden Streitigkeiten wegen unzureichender erdbautechnischen Angaben der Beauftragung  
vermieden und das stets vorhandene Baugrund-Risiko beherrscht. Auf diese Weise wurden im

Laufe der Jahrzehnte die Erdbauabschnitte von mehr als 100 km Straßen- und Autobahnbauteilen sowie mehr als 1 Mio. m<sup>2</sup> mineralische Deponieabdichtungen [9] sicher beurteilt und zuverlässig abgewickelt.

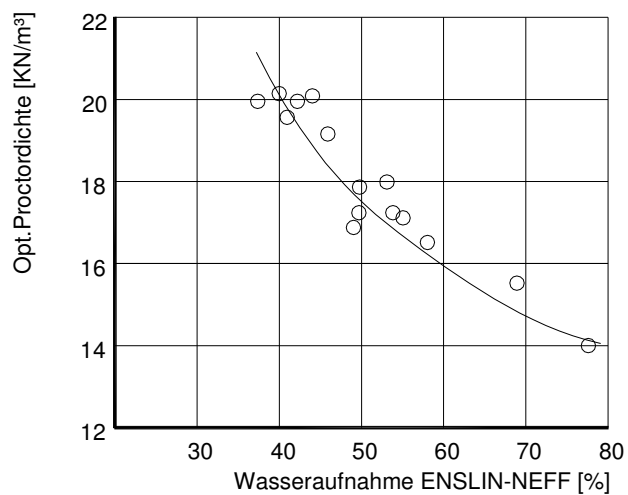


Abb.8a: Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF (T = 4 min) und Richtwerte Opt. Proctor-Dichte nach NEFF (1959/2005)

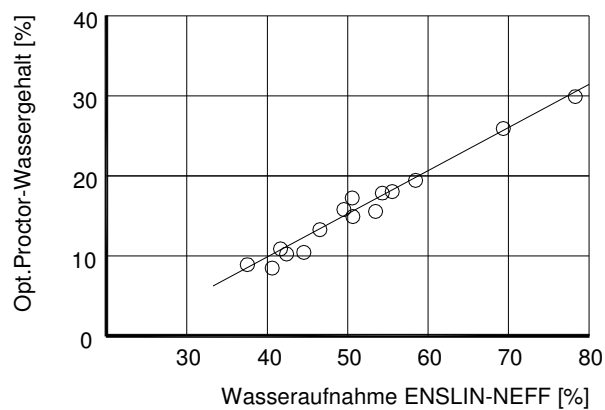


Abb.8b: Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF (T = 4 min) und Richtwerte Opt. Proctor-Wassergehalt nach NEFF (1959/2005)

## 2.2. Frosthebung, Schrumpfen und Quellen

### 2.2.1. Frosthebung

Im Rahmen der tonmineralogisch orientierten Grundlagenforschung der 30er Jahre wurde u. a. gem. Abb. 9 nachgewiesen [4], dass reines Quarzmehl (Grobschluff bis Feinsand) mit einer rein kapillaren Wasseraufnahme um  $W_A = 30\%$  im Frostversuch infolge kapillarem Wassernachschub aus der frostfreien Zone die größte Hebungstendenz besitzt (Abb. 9 a). Ähnlich groß ist die Frosthebungstendenz von reinem Kaolin-Tonmehl mit einer Wasseraufnahme um  $W_A = 70\%$ . Dagegen zeigen die Na-Bentonit-Gemische bereits ab Bentonit-Gehalten über 30% nur noch eine sehr geringe Frosthebungstendenz, trotz der Wasseraufnahme weit oberhalb  $W_A = 100\%$ .

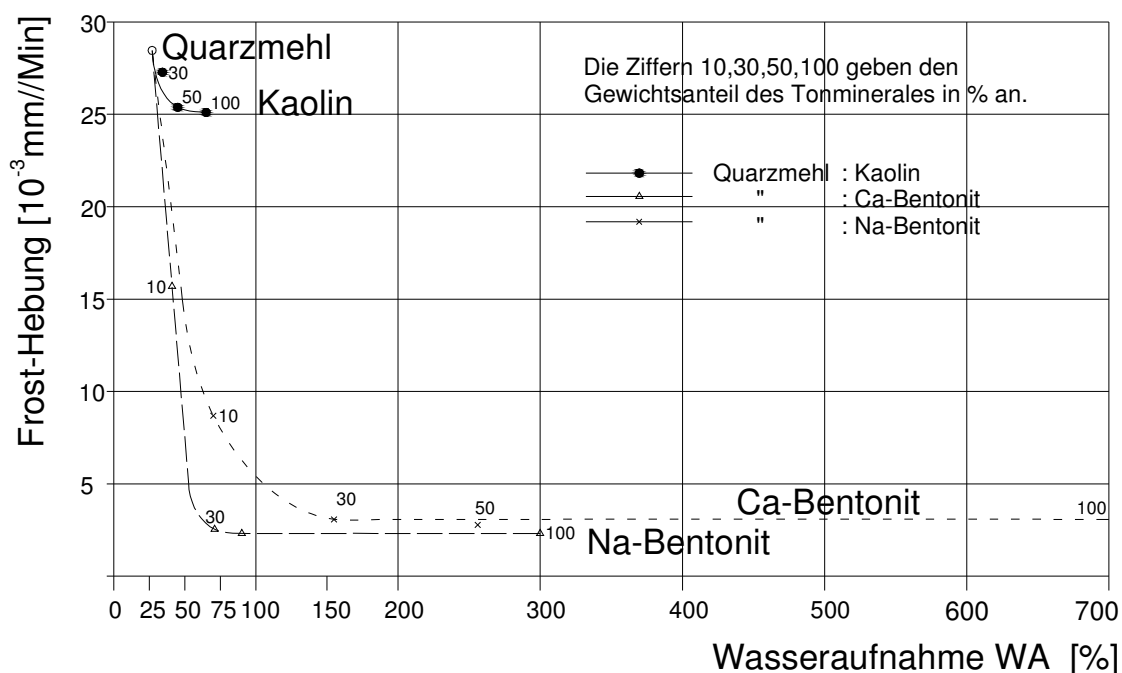


Abb.9a: Wasseraufnahme ENSLIN und Frosthebung  
nach ENDELL (1941)

Dies ist nach den Ergebnissen der Grundlagenforschung darauf zurückzuführen, dass nur das in den Hydrathüllen der quellfähigen Tonminerale gebundene Wasser gefriert, dadurch aber der kapillare Wassernachschub aus der frostfreien Zone weitgehend unterbunden wird. Hierzu sollte künftig zur Beurteilung der Frostempfindlichkeitsklassen nach ZTVE bei Frostversuchen auch der Wasseraufnahme-Kennwert herangezogen werden.

## 2.2.2. Schrumpfen und Quellen

Abb. 9 b zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Schrumpfgrenze von dem Wasseraufnahmekennwert. Offensichtlich ist dabei zwischen verdichteten Böden, wie sie z. B. bei Abdichtungen im Deponiebau vorliegen, und gewachsenen Böden zu unterscheiden, wie sie bei der Untersuchung von Hochbausetzungsschäden infolge Saugwurzel-Wasserentzug anfallen.

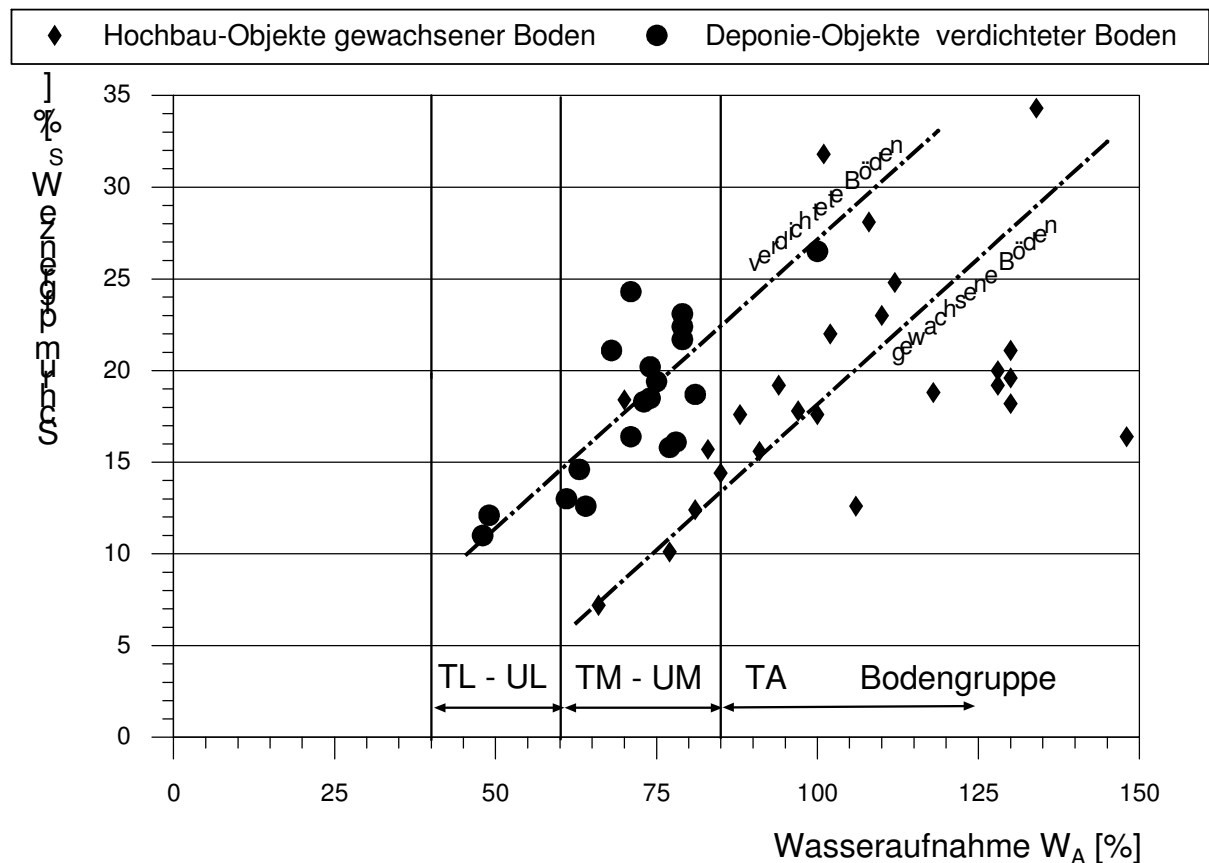


Abb.9b: Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF und Schrumpfgrenze  $W_s$  bei verdichteten und gewachsenen Böden nach NEFF (2002/2005)

Analog der Schrumpfung ist bei Wasserzufuhr in Abhängigkeit von dem Vorhandensein quellfähiger Tonmineralien ein Quellen, verbunden mit Quelldruckbildung, zu erwarten, wie dies bereits durch die Grundlagenforschung der 30er Jahre nachgewiesen wurde. Neuere eingehende Untersuchungen, z. B. mit quellfähigen Tonböden aus Senegal, weisen u. a. nach, dass Quelldrücke  $> 150 \text{ KN/m}^2$  ab Wasseraufnahme

$W_A = 41 + T \cdot 0,82$  [%] für einen Anteil von quellfähigem Tonkorn  $T > 25$  %, d. h. Wasseraufnahmen ab rd.  $W_A = 60$  % zu erwarten sind (Diss. DIENG 2000 [15]).

### 2.3. Zeitsetzung und Zusammendrückung im Kompressionsversuch

Abb. 10 a zeigt das Zeitsetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Größe des Wasseraufnahme-Kennwertes. Dieser Zusammenhang ist aus einer Datenbankuntersuchung des Verfassers an der TH Darmstadt abgeleitet und wird durch die jahrzehntelange ETN-Praxis bestätigt [8]. Da schon seit TERZAGHI bekannt ist, dass das Zeitsetzungsverhalten von der Durchlässigkeit des Bodens abhängt, ist mit diesem Diagramm indirekt nachgewiesen, dass eine zunehmende Wasseraufnahme mit einer Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwertes verbunden ist (vgl. auch Abschnitt 2.5). Nachdem in den einzelnen Laststufen des Kompressionsversuches (Oedometerversuch mit Probenhöhe 2,0 cm und Probendurchmesser 10 cm) stets das durchlässigkeitsabhängige Abklingen der Zusammendrückung abgewartet wird, ist es nicht überraschend, dass die Größe des Steifemoduls wassergesättigt eingebauter Proben primär vom Einbau-Wassergehalt und der jeweiligen Druckstufe abhängt (s. Abb. 10b).

Dementsprechend konnten auch die Wassergehalte der organischen Böden, obwohl sie im getrockneten Zustand im Wasseraufnahmeversuch keine verwertbaren Ergebnisse bringen, in das Steifemodul-Diagramm einbezogen werden. Umfangreiche Setzungsmessungen bei Einzelprojekten bestätigen die Zuverlässigkeit dieses Zusammenhangs mit mehr als 90 % Prognose-Sicherheit.

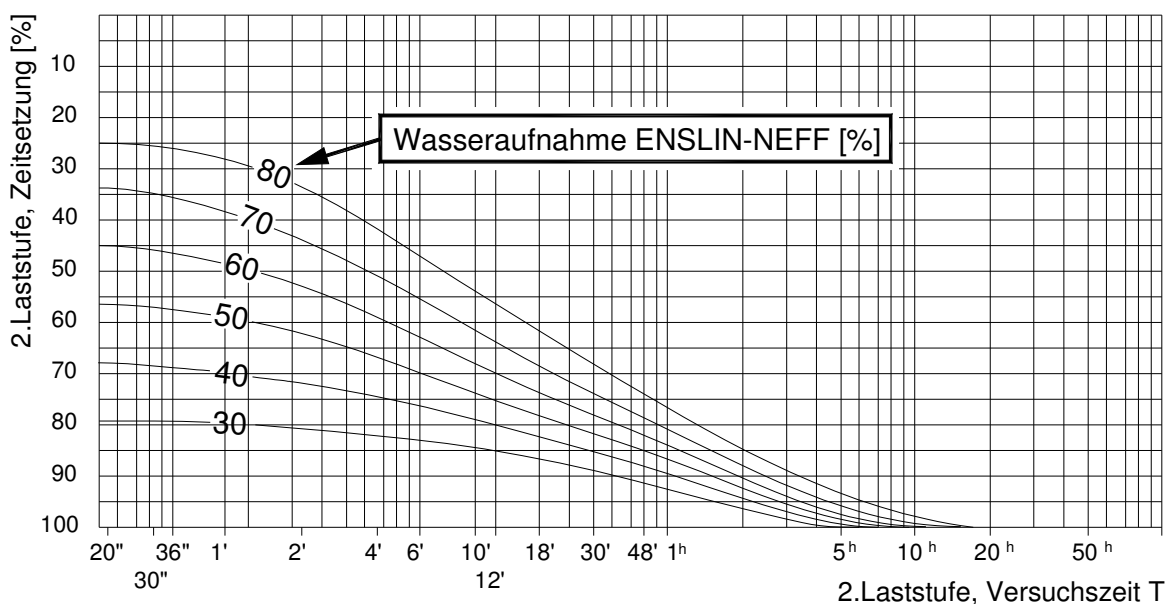


Abb.10a: Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF ( $t = 4$  min) und Richtwerte Zeitsetzung im Oedometer 2. Laststufe ( $p=125$  KN/m<sup>2</sup>) nach NEFF (1988/2005)



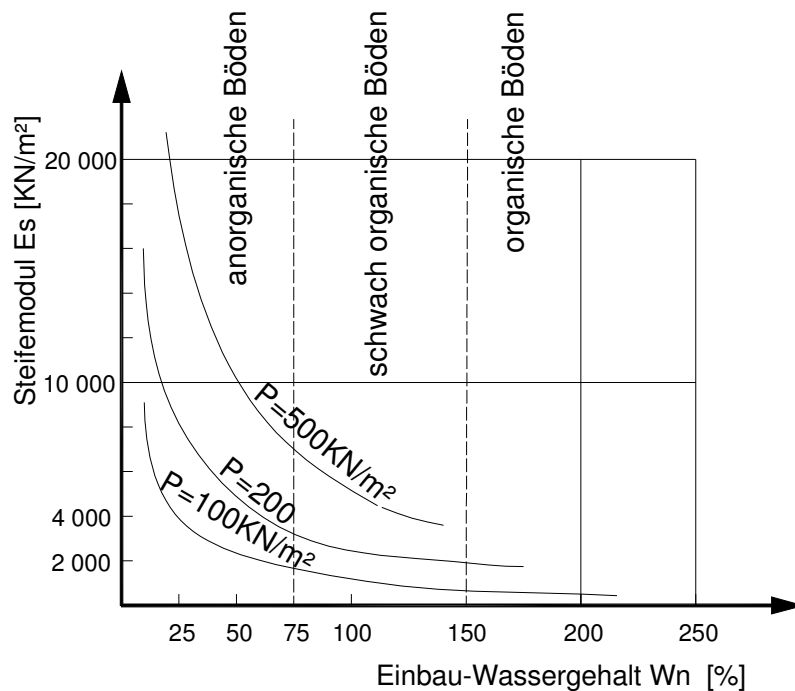


Abb.10b: Einbau-Wassergehalt und Steifemodul bei Erstbelastungs-Stufen  $P$  im Oedometer (Richtwerte) nach NEFF (1988/2005)

## 2.4. Reibungswinkel und Kohäsion im Rahmen-Scherversuch

Abb. 11 zeigt im Diagramm-Teil „A“ die Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung von dem Wasseraufnahme-Kennwert. Dieser Zusammenhang steht prinzipiell im Einklang mit der Grundlagenforschung der 30er Jahre sowie den Berechnungskennwerten für Erddruckermittlungen nach DIN 1055, Teil 2 „Lastannahmen für Bauten, Bodenkenngrößen; Wichte, Reibungswinkel, Kohäsion, Wandreibungswinkel“ und wurde aus zahlreichen Einzelprojekt-Versuchen des ETN-Labors für die max. Scherfestigkeit abgeleitet. Aus Diagramm-Teil „B“ und „C“ ergibt sich die über den natürlichen Wassergehalt und den Wasserbindegrad  $W_{bg}$  die zugehörige Kohäsion. In Abhängigkeit von der Wassersättigung der beanspruchten Bodenschicht und dem zeitabhängigen Porenwasserabfluss (vgl. Zeitsetzungsverhalten Abb. 10 a) muss für den Anfangserddruck ggf. eine porenwasserdruckabhängige Abminderung des Reibungswinkels beachtet werden. Außerdem sind geringere Restscherfestigkeiten ab Wasseraufnahmen  $> 60 \%$  zu berücksichtigen.

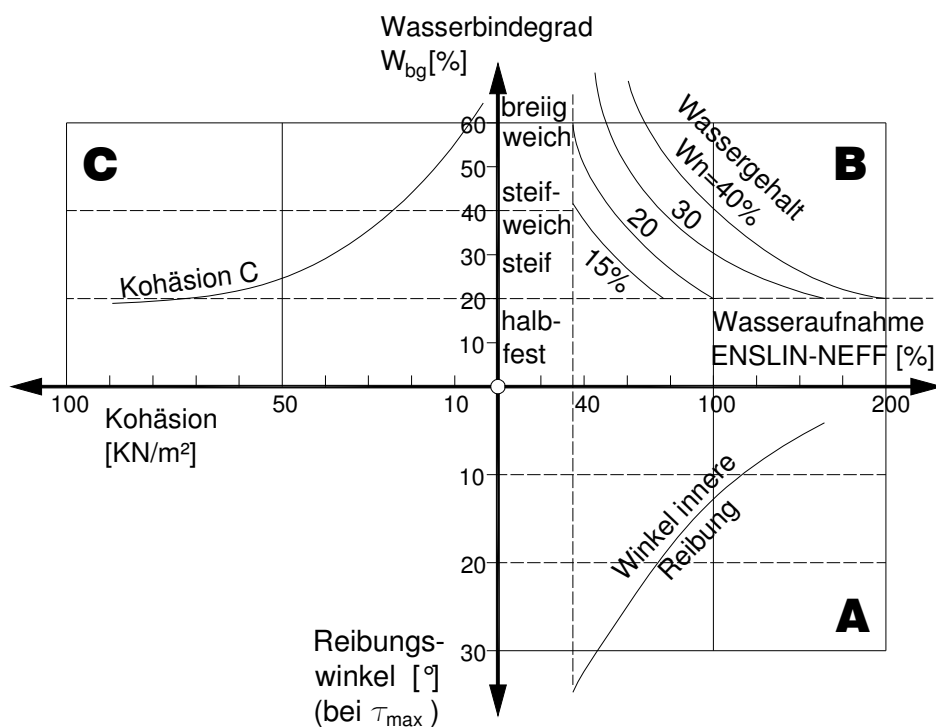


Abb.11: Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF ( $T = 4$  min) Winkel der inneren Reibung (A) im Rahmenscherversuch, Wasserbindegrad  $W_{bg}$  (B) und Kohäsion (C) (Richtwerte Maximalscherfestigkeit) nach NEFF (1988/2005)

## 2.5. Durchlässigkeit im 3-achsial-Versuch ( $i=30$ )

Im Rahmen der BMFT-Forschungsarbeiten des ETN-Labors wurden 1989 bis 1994 bei einer begleitenden Eigen- und Fremdüberwachung der Oberflächenabdichtung von ETN umfangreiche Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der Wasseraufnahme bei einer Großdeponie durchgeführt [9]. Bei rd. 400.000 m<sup>2</sup> Abdichtungsfläche wurden hier für die 3 Dichtungslagen rd. 300.000 m<sup>3</sup> Lösslehm- und Lössmaterial aus über 10 Großbaustellen des Rhein-Main-Gebietes verwandt. Das Lössmaterial (Schluff, sandig, kalkhaltig) wurde mit Bentonit leicht konditioniert und so die Bindigkeit des Bodens erhöht. Dabei war im Hinblick auf die Standsicherheit der mit 1:3 geneigten Böschungsbereiche ein Reibungswinkel von 25° einzuhalten und deshalb gem. Abb. 11 A ein Richtwert der Wasseraufnahme von  $W_A < 60\%$  zu beachten oder der Einbau ist in flacher geneigten Plateaubereichen der Deponie erfolgt.

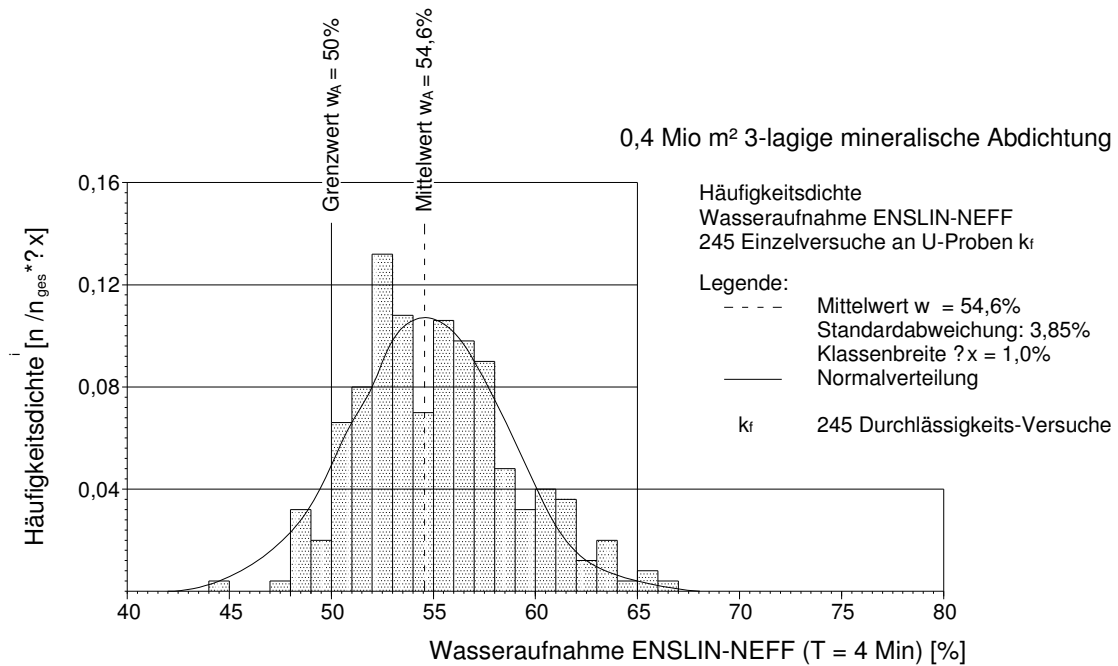


Abb. 12a: Qualitäts-Lenkung mit Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF (T = 4 min)  
Forschungsbericht NEFF, WALTER, MÜNTER (1994)

Abb. 12 a zeigt bei dem mit 97 % Proctordichte eingebautem Abdichtungsmaterial eine rel. große Bandbreite entsprechend einer Gauß'schen Normalverteilung der Wasseraufnahme  $W_A$  und Abb.12 b im Vergleich dazu die zugehörige halb-logarithmische Verteilung der Durchlässigkeits-Beiwerte. Diese Bandbreiten resultieren aus den unterschiedlichen Herkunftsorten. Da in den behördlichen Deponie-Zulassungen stets ein Mindestwert der Abdichtungswirkung, hier z. B.  $k_f < 1,0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ , gefordert wird, muss die Qualitätslenkung dafür sorgen, dass dieser Wert in jedem Fall eingehalten wird. Dies wird hier mit dem Wasseraufnahme-Richtwert von  $W_A = 50 \%$  bei makroporen-freiem Einbau i. d. R. erreicht. Für eine höhere Abdichtungsanforderung  $k_f < 5 \times 10^{-10} \text{ m/sec}$  ist  $W_A > 55 \%$  zu beachten.

Diese praxisreif zur Anwendung gekommenen Forschungsergebnisse sind u. a. als GDA-Empfehlung E 5-8 der DGGT (3. Auflage 1997) veröffentlicht. Darin ist auch dargestellt, dass bei Abdichtungen im Deponiebau, im Vergleich zu den Verdichtungsanforderungen des Straßenbaus gem. ZTVE mit einer statistischen Qualitätszahl  $Q = 0,88$  für die Proctordichte, eine weitaus bessere Qualitätszahl von  $Q = 1,66$  erreicht werden muss. Somit hat der Deponiebau, eine Verbesserung der geotechnischen Qualität herbeigeführt.

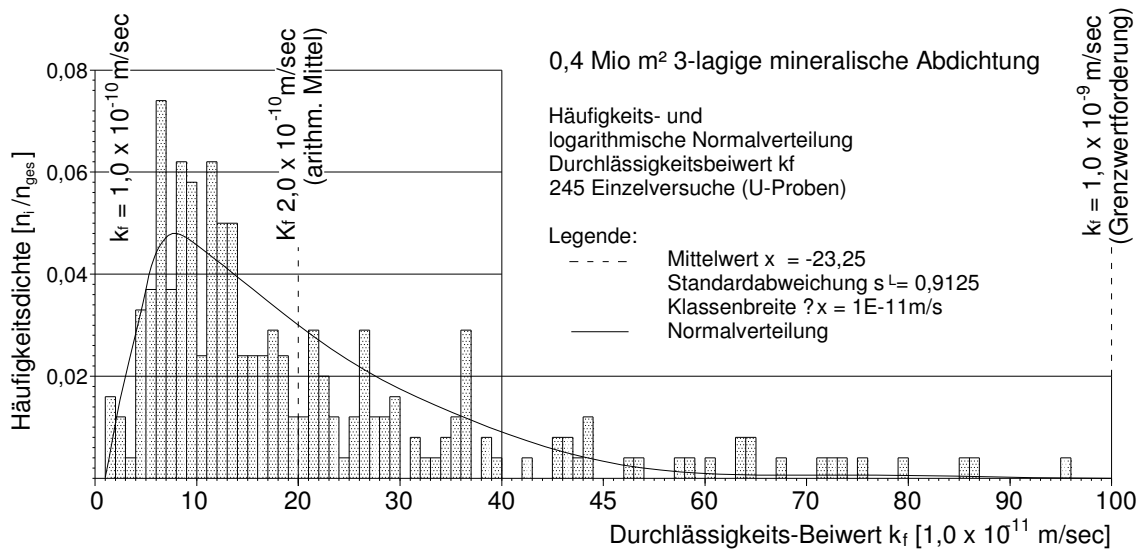


Abb. 12b: Qualitäts-Kontrolle Durchlässigkeits-Beiwerte ( $i = 30$ )  
 Forschungsbericht NEFF, WALTER, MÜNTER (1994)

### 3. BODENPHYSIKALISCH/BODENMECHANISCH GEORDNETE PARAMETERTABELLEN

In den einschlägigen Lehrbüchern über Laboruntersuchungen, z. B. MUHS (1957) und SCHULTZE-MUHS (1967), bis zu den heutigen Auflagen des Grundbautaschenbuchs wird in der Abfolge der Darstellung der Kennwerte vom 3-Phasen-System des Bodens ausgegangen. Dementsprechend werden die bodenphysikalischen Kennwert-Versuche nicht vorrangig im Hinblick auf die bestehenden Beziehungen zu den bodenmechanischen Parametern behandelt. Es gibt bisher m. W. auch keinen Vorschlag zu einer bodenphysikalisch systematisch geordneten Parametertabelle. Eine wesentliche Voraussetzung für die Qualitätskontrolle der in Abschnitt 2 dargestellten Versuchsergebnisse des ETN-Labors ist deshalb von Anfang an die tabellarische Einteilung der bodenphysikalischen Kennwerte in Stoff- und Zustandskennwerte gem. Tab. 3a und 3b getrennt d.h. für den Erdbau/Grundbau und Erdbau/Deponiebau vorgesehen worden. So wird auf einfache Weise entsprechend den bodenphysikalischen Zusammenhängen die Plausibilität der ermittelten bodenphysikalischen Kennwerte und bodenmechanischen Parameter Kennwert-orientiert in den Tabellen-Spalten und Probenorientiert, d.h. tiefen- bzw. schichtorientiert in den Tabellen-Zeilen geprüft.

Tab. 3a: Bodenphysikalisch/bodenmechanisch geordnete Parameter-Tabelle für Qualitätslenkung, Qualitätssicherung und Datenbanken  
- Erdbau / Grundbau -

Identifizierung			Stoff-Kennwert									Zustands-Kennwert					Parameter Erdbau / Grundbau						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
																							Entnahmestelle Bohrung, Schurf, Tiefe
			<b>Qualitätskontrolle:</b> In den <b>Tabellen-Spalten</b> (Kontrolle Einzelversuche) 1 bis 18 und 19 bis 23 (Erdbau/Grundbau). Die Bodenbeschreibung muß mit den Stoff- und Zustands-Kennwerten sowie Bodengruppen und Bodenklassen in Übereinstimmung stehen. Die bodenmechanischen Parameter sind auf Widersprüche zu den Erfahrungs-Richtwerten zu überprüfen. In den <b>Tabellen-Zeilen</b> (Kontrolle Schichtenfolge) ist Vergleich innerhalb der Homogen-Bereiche vorzunehmen.																				

Tab. 3b: Bodenphysikalisch/bodenmechanisch geordnete Parameter-Tabelle für Qualitätslenkung, Qualitätssicherung und Datenbanken - Erdbau / Deponiebau -

Identifizierung			Stoff-Kennwert									Zustands-Kennwert						Parameter Erdbau / Deponiebau						
Entnahmestelle Bohrung, Schurf, Tiefe	Boden- und Konsistenz- Beschreibung DIN 4022-1	Güteklasse DIN 4021	Wasseraufnahme $W_A$	Plastizitätsgrenzen $W_L/W_P$	Plastizitätszahl $I_p$	Kornichte	Tongehalt	Schluffgehalt	Kalkgehalt	Glühverlust	Bodengruppe DIN 18 196	Wassergehalt $W_n$	Wasserbindegrad $W_{bg}$	Konsistenz $I_c$	Dichte feucht / trocken	Porenzahl	Bodenklasse DIN 18 300	Opt. Proctor-Dichte	Opt. Wassergehalt	Proctor-Grenzwert $WP^{97}$	Diff.-Wassergeh. $W_n/W_P^{97}$	Durchlässigkeit-Bewert		
																							1	2
			<b>Qualitätskontrolle:</b> In den <b>Tabellen-Spalten</b> (Kontrolle Einzelversuche) 1 bis 18 und 24 bis 28 (Erdbau/Deponiebau). Die Bodenbeschreibung muß mit den Stoff- und Zustands-Kennwerten sowie Bodengruppen und Bodenklassen in Übereinstimmung stehen. Die bodenmechanischen Parameter sind auf Widersprüche zu den Erfahrungs-Richtwerten zu überprüfen. In den <b>Tabellen-Zeilen</b> (Kontrolle Schichtenfolge) ist Vergleich innerhalb der Homogen-Bereiche vorzunehmen.																					

Widersprüche können so bereits von den Laboranten durch Wiederholversuche geprüft und ggf. erforderliche Zusatzuntersuchungen vom wissenschaftlichen Bearbeiter festgelegt werden.

Eine von der Fachwelt akzeptierte, bodenphysikalisch/bodenmechanisch geordnete Parametertabelle würde es auch erlauben, aus Forschungsberichten, Gutachten oder Expertisen auf vereinfachte Weise eine Verknüpfung mit eigenen Erfahrungen herzustellen.

#### **4. SCHLUSSBEMERKUNG**

Mein Dank gilt den Laboranten und wissenschaftlichen Mitarbeitern des ETN Erdbaulaboratorium Tropp-Neff und Partner sowie meinen Partnern, Dipl.-Ing. Tropp, Dr. Walter und Dipl.-Ing. Heinze, für die Realisierung der Qualitätszielsetzungen des ETN.

Herrn Dipl.-Ing. M. Pietsch danke ich für die kürzlich erfolgte Bereitstellung seiner fortschrittlichen Forschungsuntersuchungen mit dem ENSLIN-BAW-Gerät der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

Insbesondere danke ich dem Österreichischen Ingenieur- und Architekturverein sowie dem Österreichischen Nationalkomitee der ISSMGE, dessen Vorsitzenden Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr.h.c Heinz Brandl, der mir in meinem 50. geotechnischen Berufsjahr auf der 5. österr. Geotechniktagung 2005 in Wien Gelegenheit zu diesem Beitrag gegeben hat.

## LITERATUR

- [1] Terzaghi, K. (1925): *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Verlag Deuticke, Leipzig und Wien
- [2] Enslin, O. (1933): *Über einen Apparat zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme an quellbaren und porösen Stoffen und zur Charakterisierung der Benetzbarkeit*. Chemische Fabrik
- [3] Endell, K., Loos, W., Breth, H. (1939): *Zusammenhang zwischen kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung*. Band 15 Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen
- [4] Endell, K. (1941): *Die Quellfähigkeit der Tone und ihre bautechnische Bedeutung*. Die Bautechnik, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [5] Casagrande, A. (1948): *Classification and Identification of soils*. Americ. Soc. Civ. Engineers, Bd. 13
- [6] Bjerrum, L. (1952): *Beziehungen zwischen Proctor-Verdichtungswerten und Fließgrenzen-Wassergehalt*. Straße und Verkehr, Heft 2 bis 5
- [7] Neff, H. K. (1959): *Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslin-Gerätes*. Die Bautechnik, Heft 11, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [8] Neff, H. K. (1988): *Der Wasseraufnahmeversuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte*. Bautechnik, Heft 5, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [9] Neff, H. K., Walter, H., Münter, H. (1994): *BMFT-Forschungsbericht Hausmüll-Deponie Dreieich-Buchsschlag der Stadt Frankfurt am Main*. KFZ 1430 26011. Schlussbericht Gesamtprojekt, Eigenverlag ETN
- [10] Neff, H. K. (1996): *Geotechnische Maßnahmen zur Sicherung und Ertüchtigung einer Großdeponie*. Seminar Deponien und Altlasten TU Aachen 1996, Hrsg. O. Prof. Dr. Ing. W. Wittke. Sonderdruck A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield 1997
- [11] Neff, H. K. (1997): *GDA-Empfehlungen Deponien und Altlasten der DGGT, Vorwort Schriftleitung und Empfehlung E 5-8 „Qualitätslenkung und statistische Prüfkriterien“*. Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [12] Neff, H. K. (2002): *Untersuchung von Schrumpfrissen in einem mineralischen Abdichtungskörper*. Statusworkshop des Arbeitskreises 6.1 Deponiebauwerke, Arbeitsgruppe 7 der DGGT. Eigenverlag Prof. Dr.-Ing. Ramke, FH Höxter
- [13] Pietsch, M. (1994): *Der Enslin-Versuch eine wirtschaftliche Alternative zur herkömmlichen Konsistenzbestimmung?* Laborbericht Nr. 011 der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (BAW), Abteilung Geotechnik, Geotechnisches Laboratorium, Eigenverlag BAW



- [14] Pietsch, M., Schulz, H. (1996): *Alternative Konsistenzbestimmung unter Berücksichtigung der Festigkeit bindiger Böden*. Laborbericht Nr. 015 der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, Abteilung Geotechnik, Geotechnisches Laboratorium, Eigenverlag BAW
- [15] Dieng, M. A. (2000): *Das Quellverhalten von Residualböden im NW Dakars, seine Ursache und seinen Einfluss auf Bauwerksgründungen*. Diss. Fakultät Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften TH Berlin. Verlag Mensch u. Buch, Berlin
- [16] Kugler, H., Schwaighofer, B., Gruber S. (2003): *Modifizierungen des Wasseraufnahmeversuchs nach ENSLIN-NEFF*. 4. Österreichische Geotechniktagung, Wien, Eigenverlag
- [17] Dieng, M.A. (2005): *Der Wasseraufnahmeversuch nach DIN 18 132 in einem neu entwickelten Gerät*, Bautechnik, Heft 1. Verlag Ernst u. Sohn Berlin

## REGELWERKE

- ZTVE *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau* (ZTVE – StB 94 Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1994)
- GDA *Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten*. Hrsrg. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) 3. Auflage 1997. Verlag Ernst & Sohn, Berlin mit fortlaufenden Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 „Deponiebauwerke“ der DGGT in Heft 9 der Bautechnik 1998 bis 2004

**ETN Versuchsstand**

Wasseraufnahme ENSLIN-NEFF  $\triangleq$  DIN 18 132

mit Waage  $\pm 0,001$  g

Exikator

Pulverisette FRITSCH



Wasseraufnahme-Gerät ENSLIN-NEFF  $\triangleq$  DIN 18 132

