

Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte

Zusammenfassung

Zum Stand der Prüfung bodenphysikalischer Eigenschaften von feinkörnigen Böden und Stoffen wird der Zusammenhang zwischen der neu gefaßten DIN 4022, Teil 1 (1987) sowie der GDA-Empfehlung E3-1 (1987) unter besonderer Berücksichtigung der tonmineralogisch und chemisch bedingten Veränderungsmöglichkeiten des bodenphysikalischen Verhaltens dargestellt. Zur Untersuchung dieser Zusammenhänge wurde der Wasseraufnahme-Versuch als zusätzliches Prüfverfahren in die GDA-Empfehlung E3-1 aufgenommen und wird hier nach dem heutigen Stand der Versuchstechnik beschrieben. Aus der geotechnischen Praxis werden Versuchsergebnisse und Zusammenhänge zur allgemeinen Anwendung in der Geotechnik gezeigt.

Summary

The water absorption test as part of soil physics investigations and geotechnical empirical values. In order to outline the latest results of investigations into the physical properties of fine soil and materials, the relation between the new edition of DIN 4022, Part 1 (1987), and GDA Recommendation E3-1 (1987) is shown, particular consideration being given to the modifications which can occur to the physical behaviour of the soil as a result of clay-mineralogical and chemical action. The water absorption test was included in GDA Recommendation E3-1 as an additional testing method in order to investigate these relations. This test is described here in accordance with the latest developments of testing technology. Test results and interrelations from geotechnical practice are provided in order to illustrate general usage.

1 Vorbemerkungen

Mit Einführung der GDA-Empfehlung E3-1 (1987) wird bei der geotechnischen Eignungsprüfung von mineralischen Oberflächen- und Basisabdichtungen zur Prüfung der chemischen Langzeitbeständigkeit nicht nur eine genaue Einordnung nach der neu gefaßten DIN 4022, Teil 1 (1987), sondern eine möglichst eindeutige bodenphysikalische Identifizierung und Kennzeichnung der Abdichtungsmaterialien erforderlich. Auch ist die Streubreite der Kennwerte als Grundlage des geotechnischen Bauentwurfes zu ermitteln [1]. Hierzu wird in der GDA-Empfehlung als zusätzliche bodenphysikalische Prüfung der Wasseraufnahmeversuch [2] und bedarfsweise eine tonmineralogische Analysierung des Feinstkornanteils der Böden eingeführt. Dies ist Anlaß, den Stand der tonmineralogisch orientierten bodenphysikalischen Prüftechnik bzw. die Zusammenhänge zwischen DIN 4022, Teil 1 und GDA-Empfehlung E3-1 unter besonderer Berücksichtigung der chemischen Gesichtspunkte darzustellen und damit die eingeführte zusätzliche Untersuchungsmethode zu begründen.

Ausgehend von der bisherigen Anwendung des Wasseraufnahme-Versuchs werden die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten in der bodenphysikalischen Prüftechnik behandelt. Als Grundlage für eine einheitliche Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung im Sinne der grundsätzlichen Prüfanforderungen nach [3] wird die

Untersuchung mineralischer Böden und Stoffe im Wasseraufnahme-Prüfverfahren dargestellt. Die aus dem Wasseraufnahme-Versuch abgeleiteten Kennwerte werden behandelt. Aus der geotechnischen Praxis werden Beispiele und Erfahrungswerte mitgeteilt und Fragen der Prüfung chemischer Abhängigkeiten abschließend aufgezeigt.

2 Stand der bodenphysikalischen Prüfung

Als Voraussetzung für die Beurteilung geotechnischer Eigenschaften ist die einheitliche Benennung und Beschreibung von Bodenarten in DIN 4022, Teil 1 geregelt. Entsprechende Unterscheidungsmerkmale werden in der Norm angegeben, die „im allgemeinen eine hinreichend zutreffende Einordnung gestatten“. Die Einordnung ist so gegliedert, daß an Hand der normgemäßen Benennung und Beschreibung die Einteilung in Bodengruppen, d. h. Klassifikation nach DIN 18 196 oder in Bodenklassen nach VOB DIN 18 300 bzw. ZTVE möglich ist. Auch können nach dieser Einordnung aus Tabellen der DIN 1054 die zulässigen Bodenpressungen in Regelfällen, oder aus Tabellen der DIN 1055 Bodenkenngößen für erdstatische Berechnungen entnommen werden. „Eine genaue Einordnung, die durch Korngrößenanteile, Konsistenzgrenzen oder organische Anteile festgelegt ist, kann nach der Norm jedoch nur auf Grund von Versuchen im Labor vorgenommen werden.“

2.1 Tonmineralogisch orientierte Identifizierung von mineralischen Böden und Stoffen

Feinkörnige Böden sind nach DIN 4022, Teil 1 solche, deren Identifizierung (Benennung) ausschließlich an den plastischen Eigenschaften und gemischtkörnige Böden solche, deren Identifizierung sowohl an den plastischen Eigenschaften, als auch an der Kornverteilung orientiert wird.

Grobkörnige Böden, d. h. Böden mit einem Feinkornanteil $< 5\%$ werden nach DIN 4022, Teil 1 nur nach der Kornverteilung unterschieden. Dies gilt auch für gemischtkörnige Böden, d. h. Böden mit einem Feinkornanteil (Schluff und oder Ton) von 5% bis 40% , wenn diese keine plastischen Eigenschaften besitzen. D. h. im Knetversuch zeigen diese Böden kein plastisches Verhalten und erreichen im Trockenfestigkeitsversuch nicht mindestens eine mittlere Trockenfestigkeit.

Das Erfordernis dieser völlig unterschiedlichen Identifizierungsverfahren ist bekanntlich darauf zurückzuführen, daß im Feinstkorn $< 0,002$ mm Tonminerale oder organische Substanz von unterschiedlichster bodenphysikalischer Verhaltensweise enthalten sein können.

Ebenso sind die Auswirkungen der Tonminerale oder der organischen Substanz auf das bodenmechanische Verhalten bei Beanspruchung, z. B. bei Verdichtung, Zusammendrückung, Abscheren, Durchströmung oder beim Schrumpfen durch Wasserentzug und Quellen durch Wasseraufnahme, von sehr unterschiedlicher Art. Auch können sich je nach den Entstehungsbedingungen, z. B. bei der Sedimentation, unterschiedliche Porenraumstrukturen bei der gegenseitigen Anlagerung der Elementarteilchen eingestellt haben. Hierdurch ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen auf das bodenmechanische Verhalten, z. B. auf die Restscherfestigkeit oder das Zeit-Setzungsverhalten.

Dipl.-Ing. Hermann K. Neff, ETN Erdbaulaboratorium Dr. Tropp - Dipl.-Ing. Neff und Partner, Versuchsanstalt und Ingenieurbüro für Geotechnik, Königsberger Str. 9, 6303 Hungen/Oberhessen. Mitarbeiter im AK 11 der DGEG und stellvertretender Obmann im DIN-Ausschuß Baugrund/Bodenarten (DIN 4022, 4023, 18 196)

Auch Unterschiede in der gegenseitigen Anziehung der Ton-Elementarteilchen können bei der Schlämmanalyse ein unterschiedliches Sedimentationsverhalten und damit ein unterschiedliches Versuchsergebnis bewirken.

Somit kann allein an Hand der Kornverteilung nach DIN 18 123, insbesondere des Feinst- oder Schluffkornanteiles bei tonmineralhaltigen Böden eine bodenphysikalische oder bodenmechanische Aussage nicht ohne weiteres auf andere Böden oder Mineralstoffgemenge übertragen werden. Die Kennzeichnung der feinkörnigen Böden oder des feinkörnigen Anteils von gemischtkörnigen Böden muß deshalb durch Ermittlung der Wassergehalte bei definierten plastischen Grenzzuständen nach DIN 18 122 erfolgen. Diese sind besonders von Art und Menge der enthaltenen Tonmineralien und deren Wasseranlagerungsvermögen abhängig.

Dabei stellt die Fließgrenze W_L den Wassergehalt beim Übergang von flüssigem zu breiigem Verhalten dar. Die Ausrollgrenze W_P ist der Wassergehalt beim Übergang von steifem zu halbfestem plastischem Verhalten. Die Schrumpfgrenze W_S wird als der Wassergehalt ermittelt, der beim Übergang von halbfester zu fester Konsistenz, d. h. von plastischem zu nicht plastischem Verhalten vorhanden ist. Als Plastizitätszahl I_p ist der Abstand zwischen der Fließ- und Ausrollgrenze festgelegt, d. h. $I_p = W_L - W_P$.

Die Kennzeichnung eines fein- oder gemischtkörnigen Bodens oder Mineralstoffgemisches, d. h. seine Benennung als Ton, Schluff, organischer Schluff oder Ton, Sand-Ton- oder Sand-Schluffgemisch erfolgt mit Hilfe der Fließgrenze und der Plastizitätszahl im Plastizitätsdiagramm nach Bild 1. Liegt das Wertepaar oberhalb der sogen. A-Linie des Diagrammes, gekennzeichnet durch die Gleichung $I_p = 0,73 (W_L - 20)$, so handelt es sich um einen schluffigen Ton oder Ton, oder ein Sand-Ton-Gemisch. Liegt das Wertepaar unterhalb der A-Linie, so handelt es sich um ein Sand-Schluffgemisch, tonigen Schluff, organischen Schluff oder organischen Ton.

Der Grad der Plastizität wird im Plastizitätsdiagramm nach DIN 4022, Teil 1 (Bild 1) nach der Größe der Fließgrenze unterschieden:

- $W_L < 25\%$ gering plastische Sand-Ton- und Sand-Schluff-Gemische,
- $< 35\%$ leicht plastische Tone und Schluffe,
- $< 50\%$ mittel plastische Tone, Schluffe und organische Schluffe,
- $> 50\%$ ausgeprägt plastische Tone und organische Tone.

Mit zunehmender Plastizitätszahl und Fließgrenze sind dabei zunehmende Gehalte an Tonmineralien zu erwarten.

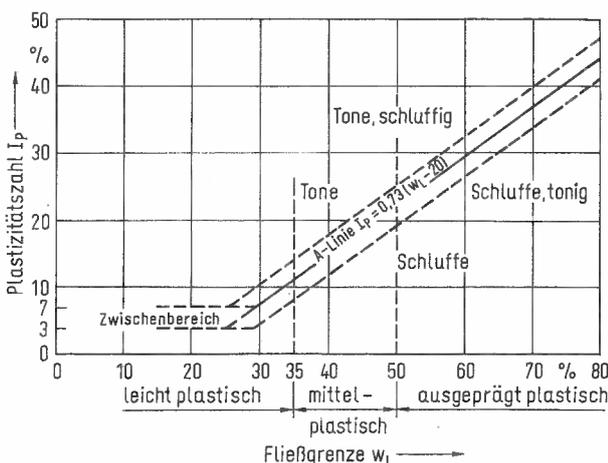


Bild 1. Plastizitätsdiagramm zum Benennen von Bodenarten nach DIN 4022, Teil 1 (1987)

Zusammenfassend ergibt sich, daß die Verfahren der bodenphysikalischen Kennzeichnung bzw. Identifizierung von feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden nach DIN 4022, Teil 1 tonmineralogisch orientiert sind. Sie gestatten eine Identifizierung der stofflichen Substanz und des jeweiligen Porengehaltes, jedoch noch keine eindeutige Identifizierung der Art der Tonmineralien und der Porenstruktur.

In GDA-Empfehlung E3-1 ist zusätzlich zur stofflichen Identifizierung der Wasseraufnahme-Versuch sowie bedarfsweise eine halbquantitative mineralogische Analyse vorgesehen. Damit wird das Vorhandensein von „Montmorillonit, Mixed Layer (d. h. Tonmineral-Gemenge), Illit oder Kaolinit sowie deren Dominanz“ entsprechend GDA-Empfehlung E3-3 nachgewiesen. In Sonderfällen ist außerdem eine eingehendere quantitative mineralogische Untersuchung erforderlich.

Auch nach der GDA-Empfehlung wird somit nicht in jedem Fall die quantitativ exakte und deshalb sehr aufwendige Analyse des Tonmineral-Bestandes einer Probe erforderlich. Es können vielmehr in Kombination mit den bodenphysikalischen Analysemethoden halbquantitative tonmineralogische Verfahren angewandt werden. Wie im folgenden Kapitel ausgeführt, ist Grundlage dieser Untersuchungssystematik, daß sich mit jeder chemisch bedingten Änderung des Tonmineral-Verhaltens auch die bodenphysikalischen Eigenschaften und bodenmechanischen Kennwerte ändern können. Umgekehrt können unter chemisch aggressiven Bedingungen bei chemisch beständigen Tonmineralien weder Veränderungen der bodenphysikalischen noch der bodenmechanischen Kennwerte eintreten.

2.2 Untersuchungssystematik chemisch bedingter Veränderungen von bodenphysikalischen Eigenschaften

Chemische Veränderungen der Feststoffe eines mineralischen Bodens, insbesondere des Feinstkornanteils, z. B. bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung durch hydraulische Bindemittel wie Kalk oder Zement, oder durch Chemikalien wie z. B. Calcium-Chlorid, sind schon länger erforscht. Sie stehen in Bezug auf die chemischen Wechselwirkungen mit dem Porenwasser-Elektrolytgehalt oder mit den Tonmineralien praxisorientiert zur Verfügung [4].

In den letzten Jahrzehnten ist in dicht besiedelten Räumen eine zunehmende chemische Veränderung des Grundwassers zu beobachten. Dabei ist die Frage einer Veränderung der bodenphysikalischen Verhaltensweise von Tonmineralien infolge chemisch bedingter Veränderungen des Porenwasser-Elektrolytgehaltes oder der Tonmineral-Substanz z. B. für Setzungssicherheitsfragen der Bodenmechanik nach DIN 1054 bisher ohne Bedeutung geblieben. Denn Bodenschichten geben beim Setzungsvorgang infolge Fundamentbelastung, ebenso wie im Kompressionsversuch im Labor, Porenwasser ab. Eine Änderung des Porenwasser-Elektrolytgehaltes ist hier deshalb auszuschließen.

Aus der Zement-Chemie ist bekannt, daß die mineralischen Hydratationsprodukte des jungen Zementsteins sich beim Schrumpfen unter Wasserabgabe in gleicher Weise wie wassergesättigtes Tonmaterial verhalten [5]. Insbesondere sind die Wechselwirkungen zwischen den hydraulischen Bindemitteln mineralischer Natur und deren Veränderung durch chemisch aggressives Wasser, Boden oder Gas nachgewiesen. Die baupraktisch orientierten Analysemethoden sind hierzu in DIN 4030 niedergelegt. Negative Auswirkungen von chemischen Veränderungen des Porenwasser-Elektrolyt-Gehaltes im Boden auf das bodenphysikalische Verhalten der Tonmineralien sind bisher in

Einzelfällen durch chemisch-tonmineralogische Untersuchungen eingehend untersucht worden [6], [7], [8].

Düllmann [9] weist bei seinen Untersuchungen an mehreren freigelegten mineralischen Deponie-Basisabdichtungen nach, daß sich infolge mehrjähriger Sickerwasser-einwirkung in den oberen Dezimetern eine chemisch bedingte Veränderung der bodenphysikalischen Eigenschaften eingestellt hat. Für die heute aktuelle Abdichtung von Deponien und Altlasten ergibt sich aus den bekannten bodenphysikalisch-chemischen Erfahrungen, daß für die Langzeitbeständigkeit von mineralischen Abdichtungsschichten chemische Abhängigkeiten nicht auszuschließen sind. Bei der Eignungsprüfung nach GDA-Empfehlung E3-1 wird deshalb dieser Veränderungsmöglichkeit in Laborversuchen nachgegangen.

Die Durchströmung von Abdichtungsschichten mit Sickerwasser bewirkt zweifellos eine Veränderung des Porenwasser-Elektrolytgehaltes bis hin zum vollständigen Austausch. Damit kann eine Veränderung des bodenphysikalischen Verhaltens der Tonminerale und damit auch deren Abdichtungswirkung verbunden sein. Außerdem ist bei der Sickerwasser-Durchströmung eine stoffliche Anlagerung (Adsorption) an die Tonminerale, z. B. von Schwermetallen möglich. Dies kann ebenfalls eine Veränderung der bodenphysikalischen Eigenschaften bewirken. In Tonmineralen bzw. Mehrschichtsilikaten adsorbierte Schwermetalle können durch Absenkung des Porenwasser-pH-Wertes wieder desorbiert werden und in der durchströmenden Flüssigkeit in Lösung gehen. Dies ist wiederum mit einer Veränderung der plastischen Eigenschaften verbunden. Auch die übrigen bodenmechanischen Eigenschaften können sich so verändern.

Nach Abschnitt 5 der GDA-Empfehlung E3-1 wird deshalb in jedem Fall einer Eignungsprüfung die Untersuchung des chemischen Langzeitverhaltens gefordert. Dazu ist der Durchlässigkeitsversuch unter dreiaxialen Einspannbedingungen bei einem hydraulischen Gradienten von $I = 30$ durchzuführen. Es ist sowohl chemisch relativ unbelastetes Grundwasser (Trinkwasser) als auch Deponie-Sickerwasser (nach GDA-Empfehlung E3-4 analysiert), oder es sind chemisch aggressive Prüfflüssigkeiten anorganischer und organischer Art zu verwenden. Auch können in Abhängigkeit von den chemischen Wechselwirkungen Versuche mit niedrigeren Gradienten erforderlich werden. Nach Abschnitt 6 der GDA-Empfehlung E3-1 sind die Materialien oder deren Feinstkornanteil auf die Veränderung der bodenphysikalischen Kennwerte bei Verwendung der Prüfflüssigkeiten zu untersuchen.

Untersuchungsergebnisse dieser Art sind dann als ausreichend gesichert anzusehen, wenn Versuche mit chemisch verschiedenen Prüfflüssigkeiten im Durchlässigkeitsversuch ausgeführt und gleichzeitig die bodenphysikalischen Kennwerte vor und nach der Probendurchströmung unverändert geblieben sind. Es kann aber auch eine gleichsinnige Veränderung eintreten, z. B. wenn bei Prüfung einer mineralischen Abdichtung die plastischen Eigenschaften zunehmen und die Abdichtungswirkung ebenfalls zunimmt oder umgekehrt. Die chemischen Auswirkungen auf das bodenphysikalische Verhalten können somit je nach der betrachteten Eigenschaft negativ oder positiv sein.

Eine selbstverständliche, aber nicht einfach einzuhalten Voraussetzung dieser Untersuchungssystematik ist, daß nur solche Proben miteinander verglichen werden, die bei Versuchsbeginn den gleichen Tonmineralbestand besitzen. Dies kann weder bei natürlich abgelagerten, noch bei künstlich hergestellten Mineralstoffgemengen vorausgesetzt und wie oben ausgeführt, schon gar nicht mit der Kornverteilungs-Analyse nach DIN 18 123 allein festgestellt werden. Im Sinne der verfügbaren genormten Verfahren

sind hierzu vielmehr Plastizitätsgrenzenversuche zur Probenidentifizierung vor der Versuchsdurchführung und erneut nach den Versuchen erforderlich. Erst dann können eingetretene Veränderungen der plastischen Eigenschaften eindeutig belegt werden.

Die Plastizitätsversuche erfordern Probenmaterial von etwa 200 g je Versuch. Schwankungen des Tonmineralgehaltes, die ggf. innerhalb dieser Stichprobe vorhanden waren, werden dabei nicht erfaßt. Außerdem ergibt sich durch die Vielzahl der Plastizitätsversuche ein erheblicher Aufwand für die Prüftechnik. Auch kann das Probenvolumen für einen zweiten Versuch zu klein sein. Zur Erweiterung der versuchstechnischen Möglichkeiten ist deshalb in GDA-Empfehlung E3-1 der Wasseraufnahme-Versuch nach [2] vorgesehen worden. Außerdem bietet sich der Versuch in der nach DIN 1054 und ZTVE orientierten Untersuchungstechnik als zusätzliche Untersuchungsstufe zwischen der Benennung und Beschreibung der Böden nach DIN 4022, Teil 1 und der genauen Einordnung auf Grund genormter Laborversuche an.

3 Wasseraufnahme-Prüfverfahren

3.1 Allgemeines zur Entwicklung und Anwendung des Versuches

Von Enslin [10] war der Versuch in der Tonmineralogie zur Ermittlung der Flüssigkeitsaufnahme von getrocknetem pulverisiertem Ton-Korn ($< 0,002$ mm) mit einer Ansaughöhe eingeführt worden, die sich aus der Schütt-Höhe einer pulverisierten 0,3 g-Probe ergibt. In der Bodenphysik wurde diese Versuchstechnik bei der Untersuchung von Mineralstoffgemengen aus Tonmineralien und Quarzkorn angewandt. Dabei wurde eine relativ straffe Korrelation zwischen der maximalen Wasseraufnahme und dem bodenmechanischen Verhalten von verschiedenen Tonmineralien und Tonmineral-Quarzgemischen nachgewiesen [11], [12].

Im Wasseraufnahme-Versuchsgerät nach Enslin-Neff [2] wird zusätzlich zur Schütt-Höhe der 1,0 g-Probe eine Ansaughöhe von 5,0 cm vorgegeben (Bild 2). Der Versuch wird damit zur routinemäßigen Untersuchung anorganischer ungleichförmiger, bindiger, d. h. mineralischer Böden mit Korngrößen bis 2 mm eingesetzt. Der Versuch dient im Bentonit-Handel der Qualitätskontrolle und wird außerdem bei der Tonmineralanalyse verwendet.

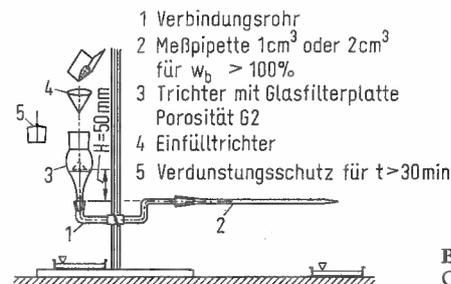


Bild 2. Wasseraufnahme-Gerät nach Enslin-Neff [2]

Die gemessene maximale Wasseraufnahme, nach Neff auch „Wasserbindevermögen W_b “ genannt, korreliert mit den Plastizitätskennwerten ebenso wie mit den optimalen und Grenzwassergehalten beim Proctor-Verdichtungsversuch nach DIN 18 127. In gleicher Weise besteht zwischen dem natürlichen Wassergehalt W_n , in % von W_b ausgedrückt und „Wasserbindegrad W_{bg} “ genannt, eine relativ straffe Beziehung zu den Konsistenzzahlen nach DIN 18 122 [2].

Der Wasseraufnahmeversuch war bei erd- und grundbautechnischen Untersuchungsprojekten am damaligen

Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau, Wasserwirtschaft und Grundbau der TH Darmstadt erprobt worden [2] und ist im Erdbaulaboratorium Dr. Tropp – Dipl.-Ing. Neff und Partner, Hungen/Oberhessen, seit 1960 bei zahlreichen geotechnischen Untersuchungen im Hoch-, Tief-, Straßen- und Wasserbau sowie seit 1974 auch im Deponiebau als Routineversuch im Einsatz. Durch Kombination mit der Wassergehaltsbestimmung, d. h. durch Pulverisierung der getrockneten Wassergehaltsprobe und deren Wasseraufnahme-Bestimmung, stehen bereits in kurzer Zeit nach der Probeneinlieferung im Labor Identifizierungs-Kennwerte sowohl zur Bandbreite der plastischen Eigenschaften, als auch zur Konsistenz, zur Verfügung. Die weitergehenden Laborversuche, d. h. die Plastizitätsgrenzenversuche, Proctorversuche, Scherversuche, Kompressionsversuche und Durchlässigkeitsversuche werden danach so ausgewählt, daß die festgestellte Bandbreite der plastischen Eigenschaften stichprobenartig gut verteilt erfaßt wird.

Der Versuch wird nicht nur mit unbelastetem Grundwasser (Trinkwasser), sondern in verschiedenen Labors auch im Sinne eines „Flüssigkeits-Aufnahmeversuches“ mit chemisch verändertem Wasser (wozu auch destilliertes Wasser gehört) oder mit chemischen Flüssigkeiten durchgeführt. Dabei wird festgestellt, wie weit ein verändertes Aufnahmeverhalten des geprüften Stoffes im Vergleich zu Wasser eintritt und hieraus auf chemisch bedingte Abhängigkeiten geschlossen [13], [14], [15] und [16].

Die Darstellung von Krenkler [5] über vergleichbare mineralogische Zusammenhänge bei Ton und hydraulischen Bindemitteln führte 1981 zur Überlegung, daß der Wasseraufnahmeversuch auch zur Kennzeichnung der stofflichen Substanz von frischen und ausgehärteten, mineralischen, Dichtmassen, z. B. Bentonit-Zement-Dichtwandmassen eingesetzt werden kann. Somit wird auch hier der Versuch zur Kennzeichnung der stofflichen Substanz und zur Prüfung von stofflichen Veränderungen bei der Aufnahme chemischer Flüssigkeiten genutzt. Hieraus wird auf das Durchlässigkeitsverhalten bei Durchströmung von aggressiven Prüf-Flüssigkeiten geschlossen [17], [18], [19].

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der Versuch sowohl zur Prüfung der Aufnahme von Wasser als auch von chemisch unterschiedlichen Flüssigkeiten durchgeführt wird. Im getrockneten, pulverisierten Zustand werden feinkörnige und gemischtkörnige Böden mit Sand als Grobkornanteil ebenso wie kalk- und zementhaltige Bodenverbesserungen oder Zement-Bentonit-Dichtmassen geprüft. Auch können verwitterte bis zersetzte Felsschichten, z. B. Tonstein-Zersatz oder Basalt-Zersatz, sowie Kluffbeläge von Felsschichten getestet werden. Die Versuchsergebnisse dienen sowohl der geotechnischen als auch der tonmineralogischen Beurteilung von mineralischen Böden und Stoffen.

Nach bisherigen Versuchs-Erfahrungen kann der Gehalt an organischen Bestandteilen bis etwa 15% Glühverlust, z. B. bei organischem Schluff oder organischem Ton gehen. Bei größerem organischem Gehalt, z. B. bei stärker organischem Schluff oder Klärschlamm, treten dagegen Benetzungswiderstände auf, die auf die Trocknung der organischen Substanz oder auf Stoffrückstände des Porenwassers zurückzuführen sind. Hier steht somit allein die Ermittlung der Plastizitätsgrenzen zur bodenphysikalischen Prüfung zur Verfügung. Auch ist es nicht auszuschließen, daß rein mineralische Böden, bei denen sich ein untypisch langsamer Verlauf der Wasseraufnahme zeigt, chemisch verunreinigt sein können.

Voraussetzung für den Vergleich von Kennwerten aus dem Wasseraufnahmeversuch zwischen verschiedenen Labors ist eine einheitliche Versuchsdurchführung, deren Ergebnisse reproduzierbar sind. Sowohl das eingesetzte Gerät als auch die Handhabung des Versuchs erfolgt z. Z.

entsprechend verschiedenen Veröffentlichungen [3], [20] in einer von [2] abweichenden Form. Auch ist die Probenvorbereitung gegenüber [2] seit längerer Zeit umgestellt worden. Zwecks einheitlicher Durchführung und Auswertung erfolgt hier deshalb die Darstellung des Wasseraufnahme-Prüfverfahrens sowohl zur Anwendung nach den GDA-Empfehlungen als auch zum allgemeinen Gebrauch in der Geotechnik.

3.2 Vorbereitung der Proben und Probenauswahl

Zur Prüfung eignen sich alle nicht verfestigten oder verfestigten, fein- oder gemischtkörnigen mineralischen Böden und Stoffe mit 0 bis 2 mm Durchmesser der Kornanteile, die sich nach erfolgter Trocknung von Hand oder mit leichtem Hammer in Teilstücke $< 0,5 \text{ cm}^3$ zerkleinern lassen. Die Pulverisierung ist bis zu einheitlicher Analysenfeinheit durchzuführen. Dies erfordert eine automatische Mörsermühle und einheitliche Mahlbedingungen. Unter Feldbedingungen ist auch eine Pulverisierung von Hand zulässig, was jedoch beim Versuchsergebnis besonders zu vermerken ist.

Je nach der vorangegangenen Laboruntersuchung stehen unterschiedlich große Probenmengen zur Verfügung. Im Hinblick auf eine einheitliche Analysenfeinheit sind 10 bis 20 g Trockenmaterial zu pulverisieren. Soll eine größere Probenmenge geprüft werden, so ist diese in entsprechende Teilmengen zu zerlegen. Da stets eine Trocknung des Materials erfolgen muß, ist immer eine Wassergehaltsbestimmung des Ausgangsmaterials möglich und auch durchzuführen.

Soweit bei anderen Laborversuchen eine Wassergehaltsbestimmung und entsprechende Probentrocknung erfolgt, kann somit diese Probe ebenfalls für den Wasseraufnahmeversuch weiter verwendet werden. Hiermit ist der Vorteil verbunden, daß dann stofflich das gleiche Material untersucht wird und natürliche Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung sich nicht auswirken können. Besonders für die Untersuchung von Kennwert-Beziehungen ist diese Probenidentität von Vorteil, da z. B. die Fließgrenzen-, Ausrollgrenzen- und Schrumpfgrenzen-Bestimmungen mit einer Wassergehaltsbestimmung enden. Auch können Kompressionsversuche, Scherversuche, Proctorverdichtungsversuche und Durchlässigkeitsversuche mit Wassergehaltsbestimmungen bei Versuchsende abgeschlossen werden.

Als Probenmaterial können somit die getrockneten Proben aus den folgenden Probenarten oder Versuchsarten verwendet werden:

Probenarten

- ungestörte oder gestörte Proben, Bohrkerne usw. aus Bohrungen, Bohrsondierungen, Schürfen
- Tonstein-, Schluffstein-, Sandstein- oder Basalt-Zersatz
- Fels-Klufffüllungen, Gleitzonenbelag
- zement- oder kalkvermörtelter Boden
- Zement-Bentonit-Massen, Zementstein
- Bentonite, Tonmehl, Quarzmehl, mineralische Füllstoffe

Zustands-Versuchsproben

- | | |
|-----------------|------------|
| – Wassergehalt | DIN 18 121 |
| – Trockendichte | DIN 18 125 |

Stoff-Versuchsproben

- | | |
|--|------------|
| – Korngrößenverteilung | DIN 18 123 |
| – Fließgrenze, Ausrollgrenze, Schrumpfgrenze | DIN 18 122 |
| – Korndichte | DIN 18 124 |

Beanspruchungs-Versuchsproben

- Proctorversuch DIN 18 127
- Kompressionsversuch
- Einaxial-, Dreiaxial- und Scherversuch DIN 18 136 und DIN 18 137
- Durchlässigkeitsversuch DIN 18 130, Teil 1

3.3 Gerät und Versuchsdurchführung

Das Wasseraufnahme-Prüfgerät besteht gemäß Bild 2 aus folgenden Einzelteilen:

- Glas-Verbindungsrohr NS 14,5/23 und NS 10/19
 - Meßpipette 1 cm³ (bedarfswise 2 cm³) NS 10/19
 - Glasaufsatz NS 14,5/23 mit eingeschmolzener Glasfilterplatte ϕ 30 mm der Porosität G 2, Verdunstungsschutz-Kappe NS 29/32
 - Stativ mit Klemme, zwei Wasser-Auffangschalen
- Das Zusatzgerät zur Versuchsdurchführung besteht aus:

- Trockenschrank, Exsikkator, Präzisionswaage
- Mörsermühle mit Achatmörser ϕ 130 mm, Pistill ϕ 70 mm, Zeitschaltuhr-Einstellung 10 min und Mahl-druck-Einstellung 75% des Maximaldrucks
- Thermometer, pH-Wert- und Leitfähigkeitsmeßgerät

Für Routineversuche wird Leitungswasser mit Trinkwasserqualität verwendet, dessen Temperatur, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit konstante Werte besitzt. D. h. vor Versuchsbeginn ist das längere Zeit im Leitungsnetz stehengebliebene Wasser abzuzapfen, bis Konstanz von Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit eingetreten ist. Für Routineuntersuchungen darf die Wassertemperatur zwischen 12 und 20 °C schwanken. Der pH-Wert soll zwischen 7,0 und 8,0, d. h. im neutralen bis schwach alkalischen Bereich und die elektrische Leitfähigkeit zwischen 300 und 500 μ S/cm liegen. Hiervon abweichende Werte sind zu protokollieren. Für Ringanalysen kann auch entmineralisiertes Wasser verwendet werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß es sich hierbei um chemisch neutrales Wasser, d. h. eine chemische Prüfflüssigkeit handelt, die im natürlichen Untergrund nicht vorkommt.

Zur luftblasenfreien Befüllung der Glasteile des Prüfgerätes muß zu Beginn einer Versuchsserie der Glasaufsatz

abgenommen, das U-förmige Glasverbindungsrohr mit der Pipette vom Stativ abgeklemmt und neu mit Wasser gefüllt werden. Beim Wiederanklemmen ist die Pipettenachse waagrecht zu justieren. Der Glasaufsatz wird unter laufendem Wasserstrahl vom Ablauf aus blasenfrei gefüllt. Dabei wird die Filterplatte durchströmt und gereinigt. Mit dem Zeigefinger wird dann der Ablauf zugehalten, der Glasaufsatz gedreht und 2 bis 3 cm über dem Glasfilter gefüllt. Sodann läßt man das Wasser aus dem Glasaufsatz über dem offenen U-Rohrende auslaufen und setzt dabei den Aufsatz luftblasenfrei in das U-Rohr ein. Das überschüssige Wasser im Glas-Aufsatz über der Filterplatte tropft dann über die Meßpipette in die Auffangschale ab. Der letzte Tropfen an der Meßpipettenspitze wird abgetupft. Der trockene Einfülltrichter wird im Glas-Aufsatz mit vertikaler Achse eingesetzt. Damit ist das Gerät versuchsbereit.

Inzwischen ist von der pulverisierten Probe, die nach der Pulverisierung nochmals im Exsikkator nachgetrocknet wurde, auf glattem, einfach geknicktem Hochglanzpapier 1 g Proben-Pulver auf 1 mg genau abgewogen worden. Diese Probe wird bei Versuchsbeginn zügig in den Einfülltrichter geschüttet. Sobald die ersten Probenpartikel die Filterplatte berühren, wird die Stoppuhr in Gang gesetzt. An der Meßpipette wird die aufgenommene Wassermenge für Wasseraufnahmen bis 1 cm³ nach 1/4, 1/2, 1, 2 und 4 Minuten Versuchsdauer abgelesen. Falls zwischen 2 und 4 Minuten keine Zunahme der Wasseraufnahme mehr auftritt, ist der Versuch beendet. Soweit nach 2 Minuten Versuchsdauer noch keine Konstanz der Wasseraufnahme erreicht ist, wird weiter beobachtet, bis diese eingetreten ist. Die Meßwerte werden in ein Versuchsprotokoll gemäß Bild 3 zusammen mit den übrigen Probandaten eingetragen. Da der Wasseraufnahmeversuch wie oben ausgeführt, aus Gründen der Proben-Identität stets im Anschluß an eine Wassergehaltsbestimmung ausgeführt wird, ist das Versuchsprotokoll mit der Wassergehaltsbestimmung kombiniert. Nach Erreichen der maximalen Wasseraufnahme, d. h. nach Versuchsende, wird der Glasaufsatz abgenommen und das Probenmaterial beseitigt, indem die Filterplatte von unten durchspült wird. Gleichzeitig wird der Glasaufsatz wie oben beschrieben wieder von unten für den nächsten Versuch luftblasenfrei gefüllt.

Versuchsprotokoll		Wasser:		Az.:	
1. nat. Wassergehalt W_n [Trockengewichts-%]		T = °C		Bauwerk:	
2. Wasserbindevermögen W_b [Trockengewichts-%] und Wasserbindegrad W_{bg} [%]		P_H =		Ort:	
		L = μ S/cm			
G_n = nat. Feuchtgewicht		G_t = Trockengewicht		S = Schalen-gewicht	
				G_w = Wassergewicht	
Bohrung:	Probe: gest. ungest.	Entnahmetiefe:		Bodenart: organ. Bestandteile:	
				Trockenfestigkeit:	
$G_n + S =$		t = 0	cm ³	t = 0	cm ³
$G_t + S =$		1/4'	cm ³	1/4'	cm ³
$G_w =$		1/2'	cm ³	1/2'	cm ³
		1'	cm ³	1'	cm ³
$G_t + S$		2'	cm ³	2'	cm ³
S =		4'	cm ³	4'	cm ³
$G_t =$			cm ³		cm ³
			cm ³		cm ³
$W_n = \frac{G_w}{G_t} \cdot 100 =$		$W_b =$	$W_{bg} = \frac{W_n}{W_b} \cdot 100 =$		$W_b =$

Bild 3. Kombiniertes Versuchsprotokoll Wassergehalt und Wasseraufnahme

Mit der 2. Probe wird der Versuch als Kontrollversuch wiederholt, und es darf bei der routinemäßigen Versuchsdurchführung im Wasseraufnahmebereich bis 1 cm³ keine Abweichung > 0,01 cm³ eintreten. Falls die Wasseraufnahme bei besonders plastischen Böden und Stoffen über 1 cm³ geht, ist bei Wasseraufnahmen bis 2 cm³ mit 0,5 g-Proben zu arbeiten. Für Bentonite mit Wasseraufnahmen zwischen 2 und 10 cm³ ist eine Meßpipette von 2 cm³ und eine Probenmenge von 0,2 g zu nehmen. Dabei können durch unterschiedlich ablaufende Quellvorgänge bei der Wasseranlagerung im Kontrollversuch Abweichungen bis zu 5 % der Endaufnahmemenge auftreten.

Die Versuche mit hochquellfähigen Bentoniten dauern bis zu 30 Stunden, so daß durch Verdunstung in der Filterplattenebene bzw. der Probenoberfläche scheinbare Wasseraufnahmen gemessen werden können. Bei diesen Langzeitversuchen ist deshalb ab 0,5 Stunden Versuchsdauer die Glaskappe einzusetzen. Die tatsächliche Verdunstungsmenge kann in einem parallel beobachteten wassergefüllten, jedoch nicht mit einer Probe beaufschlagten Gerät auch im zeitlichen Verlauf gemessen und von den Wasseraufnahmen der Probe abgezogen werden.

Bei genauer Beachtung der beschriebenen Handgriffe zur Proben- und Gerätevorbereitung gestaltet sich die Versuchsdurchführung so einfach, daß jeder Labormitarbeiter nach einigen Stunden Praxis in der Lage ist, den Versuch einwandfrei durchzuführen.

3.4 Wasseraufnahme-Kennwerte

Entsprechend der Porosität G 2 besitzt die Glasfilterplatte eine passive kapillare Steighöhe ≥ 50 mm [3]. Die Kapillarkraft der Filterplatte ist deshalb in der Lage, den Wasserspiegel 50 mm über der Pipettenachse festzuhalten. Schüttet man eine Probe aus 1 g reinem Quarzsand¹⁾ auf die Filterplatte, so sind die Poren der locker gelagerten Schüttung ebenfalls in der Lage, das Wasser über die Filterplatte hochzuziehen, bis Wassersättigung eingetreten ist. Dies ist bei Quarzsand nach einer Wasseraufnahme von 0,35 cm³ der Fall. Gleichzeitig wird das Korngerüst der Schüttung durch die Kapillarzugkraft von 50 mm + max. 10 mm belastet, so daß eine geringe Verdichtung eintritt. Dadurch verringert sich der Porenraum unter Wasserabgabe, d. h. die gemessene Wasseraufnahme des gleichkörnigen Kornhaufens nimmt bei diesem tonmineraalfreien mineralischen Stoff wieder etwas ab. Dies ist auch bei sehr gering bindigen Böden oder Stoffen mit Wasseraufnahmen bis etwa 0,45 cm³ zu beobachten [2].

Quarzkorn hat eine Korndichte von 2,65 g/cm³. Damit besitzt 1 g Quarzsand ein Festmassevolumen von 0,377 cm³. Im Endzustand des Wasseraufnahmeversuches kommt die obengenannte Quarzkornwasseraufnahme von 0,35 cm³ hinzu. Das gesättigte Probenvolumen beträgt somit 0,727 cm³ und das Feuchtgewicht der Probe 1,35 g. Die Feuchtdichte ist dann 1,857 g/cm³, die Trockendichte ist 1,375 g/cm³.

Der Porenanteil n (Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen) und die Porenzahl e (Verhältnis des Poren-

¹⁾ „Mehlsand Quarzitan“ 0–0,2 mm der Taunus Quarzwerke Bad Homburg v.d.H.

volumens zum Festmassevolumen) betragen bei Versuchsende für Quarzkorn

$$n = \frac{0,35}{0,727} = 0,481, \quad e = \frac{0,35}{0,377} = 0,928.$$

Im Vergleich hierzu nimmt ein Haufen von gleich großen Kugeln bei einer Korndichte von 2,65 g/cm³ eine lockerste Lagerung von $n = 0,476$ (max. $e = 0,908$) und eine dichteste Lagerung von $n = 0,259$ (min. $e = 0,350$) ein. Die zugehörigen Trockendichten sind min. 1,35 g/cm³ und max. 1,96 g/cm³ [3]. Somit ist nachgewiesen, daß im Wasseraufnahmeversuch in guter Nährung die kapillare Wasseraufnahme eines idealen Quarzkorn-Kugelhaufens in lockerster Lagerung geprüft wird.

Wasseraufnahmen, die bei 1 g Probenmenge über 0,35 cm³ hinausgehen, sind somit nicht auf die kapillare Ansaugung, sondern auf Adsorption des Feinstkorns, d. h. das Wasseranlagerungsvermogen zurückzuführen. Im wassergesättigten Endzustand der Proben werden dabei im Vergleich zu Quarzkorn gemäß Tabelle 1 verschiedene Feuchtdichten, Trockendichten, Porenanteile und Porenzahlen e erreicht. Die Wasseraufnahme 0,35 cm³ entspricht einem reinen Quarzkornboden, die Wasseraufnahme 1,00 cm³ einem ausgeprägt plastischen Tonboden und die Wasseraufnahme 10,0 cm³ einem hochaktivierten Bentonit.

Bei nicht bindigem Quarzpulver stellt sich somit nur eine kapillare Wasseraufnahme ein, die etwa dem Festmassevolumen entspricht, d. h. die Porenzahl erreicht im Versuch nahezu $e = 1,0$. Mit zunehmender Bindigkeit wird zusätzliches Wasser durch Adsorption der Tonmineralkorner aufgenommen, wobei die Körner infolge Wasseranlagerung quellen und die wassergesättigte Probe im Versuch eine Porenzahl von $n > 1$ erreicht. Bei $n > 1$ ist jedoch zu berücksichtigen, daß es sich hierbei um einen rechnerischen Wert handelt, in dem das adsorbierte bzw. an die Körner angelagerte Wasser dem echten Porenwasser zugerechnet wird. Im Hinblick auf diese Wasserbindekrafte bindiger Böden wird deshalb als Ausdruck dieses Bindevermogens die Größe der maximalen Wasseraufnahme nach Neff Wasserbindevermögen genannt. Das Wasserbindevermögen wird als Wassergehalt in Trockengewichts-% ausgedrückt und als Kennwert mit W_b bezeichnet [2].

Der natürliche Sättigungszustand von Böden, gekennzeichnet durch den natürlichen Wassergehalt W_n , wird im Verhältnis zu dem im Wasseraufnahme-Versuch möglichen Wassergehalt nach [2] Wasserbindegrad W_{bg} genannt mit

$$W_b = \frac{W_{\max} [g]}{G_t [g]} \cdot 100 \text{ [Trockengewichts-\%]}$$

und

$$W_{bg} = \frac{W_n}{W_b} \cdot 100 \text{ [\%]}.$$

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Mineralstoffe im Versuch bei einheitlicher Probenvorbereitung und Verwendung von chemisch einheitlichem Wasser unter einheitlichen physikalischen Bedingungen geprüft werden. Somit handelt es sich bei W_b um einen Stoffkennwert, bei W_{bg} um einen Zustandskennwert.

Tabelle 1. Wasseraufnahmen, zugehörige Dichten und Porenkennwerte bei Festmassendichte 2,65 g/cm³

Wasseraufnahme cm ³	Festmasse cm ³	Probe gesättigt cm ³	Trocken- dichte ρ (g/cm ³)	Feucht- dichte ρ [g/cm ³]	Poren- anteil n	Poren- zahl e
0,35	0,377	0,727	1,37	1,85	0,48	0,92
1,00	0,377	1,377	0,72	1,45	0,72	2,63
10,00	0,377	10,377	0,096	1,06	0,96	26,30

4 Geotechnische Erfahrungswerte

In [2] sind korrelative Beziehungen zwischen dem Wasserbindevermögen W_b und den verschiedenen Kennwerten des Proctorversuches (optimale und Grenzwassergehalte, Proctordichten) mitgeteilt worden. Zur weiteren Anwendung im Erdbau wurde empfohlen, für die in einem Baufeld vorkommenden Bodenarten „Eichkurven“ zu ermitteln. Dieser Grundsatz ist im Prinzip auf alle bodenphysikalischen und bodenmechanischen Kennwerte von fein- und gemischtkörnigen mineralischen Böden und Stoffen anwendbar. Dabei ist zu berücksichtigen, daß Korrelationen entweder zwischen stoffabhängigen Kennwerten und/oder zwischen zustandsabhängigen Kennwerten zu erwarten sind.

Um den Aussagewert der Wasseraufnahme-Kennwerte sowohl für die traditionelle an DIN 1054 und ZTVE-StB 78 orientierte Geotechnik als auch für die neuere, die chemischen Abhängigkeiten berücksichtigende Geotechnik deutlich zu machen, wird hier über die vorliegenden Untersuchungs-Erfahrungen berichtet. Die angegebenen Werte des Wasserbindevermögens wurden mit Leitungswasser (i. M. 17 °C, pH = 7,5, Leitfähigkeit $L = 380 \mu\text{S/cm}$) ermittelt.

4.1 Stoff- und Zustandskennwerte

In Tabelle 2 sind für typische Bodenarten die Mittelwerte des Wasserbindevermögens W_b sowie zugehörige Plastizitätsgrade und Bodengruppen nach DIN 18 196 angegeben, in Tabelle 3 die mittleren Wasserbindegrade als Zustandskennwerte für verschiedene Konsistenzbereiche. Aus Tabelle 4 sind für mineralische Böden unterschiedlicher Herkunft und geologischen Alters sowie für typische mineralische Stoffe, die ermittelten Werte des Wasserbindevermögens und des Wasserbindegrads zu entnehmen. Allgemein ist festzuhalten, daß die Fähigkeit zu Schrumpfen oder zu Quellen mit zunehmendem Wasserbindevermögen zunimmt. Zahlreiche Setzungsschaden-Untersuchungen ergaben, daß Schrumpfen infolge Saugwurzel-Wasserentzug ab $W_b > 70\%$ und

Tabelle 2. Mineralische Bodenarten und Mittelwerte des Wasserbindevermögens W_b

Bodenart DIN 4022, Teil 1	Wasserbinde- vermögen W_b [%] (Mittelwerte)	Plastizität	Bodengruppe DIN 18 196 (zum Vergleich)
Feinsand	< 30	keine	SE
Sand-Schluff- Gemische	30-35	gering	SU-SÜ
Sand-Ton- Gemische	35-40	gering	ST-ST
Schluffe	40-50	leicht	UL
Tone	50-60	leicht	TL
Schluffe, tonig	60-70	mittel	UM
Tone	70-85	mittel	TM
Tone	> 85	ausgeprägt	TA

Tabelle 3. Konsistenz-Bereiche und mittlere Wasserbindegrade W_{bg} mineralischer Böden

Konsistenz- Bereich	Wasserbinde- grad W_{bg} (Mittelwerte)	Konsistenzzahl K DIN 18 122 (zum Vergleich)
halbfest	< 20 %	> 1
steif	20-40 %	1 -0,8
steif-weich	40-50 %	0,8 -0,7
weich	50-60 %	0,7 -0,5
breiig	60-80 %	0,50-0,25
flüssig	> 80 %	< 0,25

$W_{bg} > 20\%$ möglich ist. Umgekehrt ist Quellen bei Bewässerung und Wasserbindegraden $W_{bg} < 30\%$ sowie $W_b > 80\%$ zu erwarten.

Bild 4 zeigt den Zusammenhang zwischen Wasserbindevermögen W_b , Wassergehalt W_n , Wasserbindegrad W_{bg} und Feuchtwichte. Darin sind die Versuchsergebnisse aus einer geologisch einheitlich sedimentierten und vorbelasteten tertiären Basis-Tonschicht (1) einer Deponie dargestellt, bei

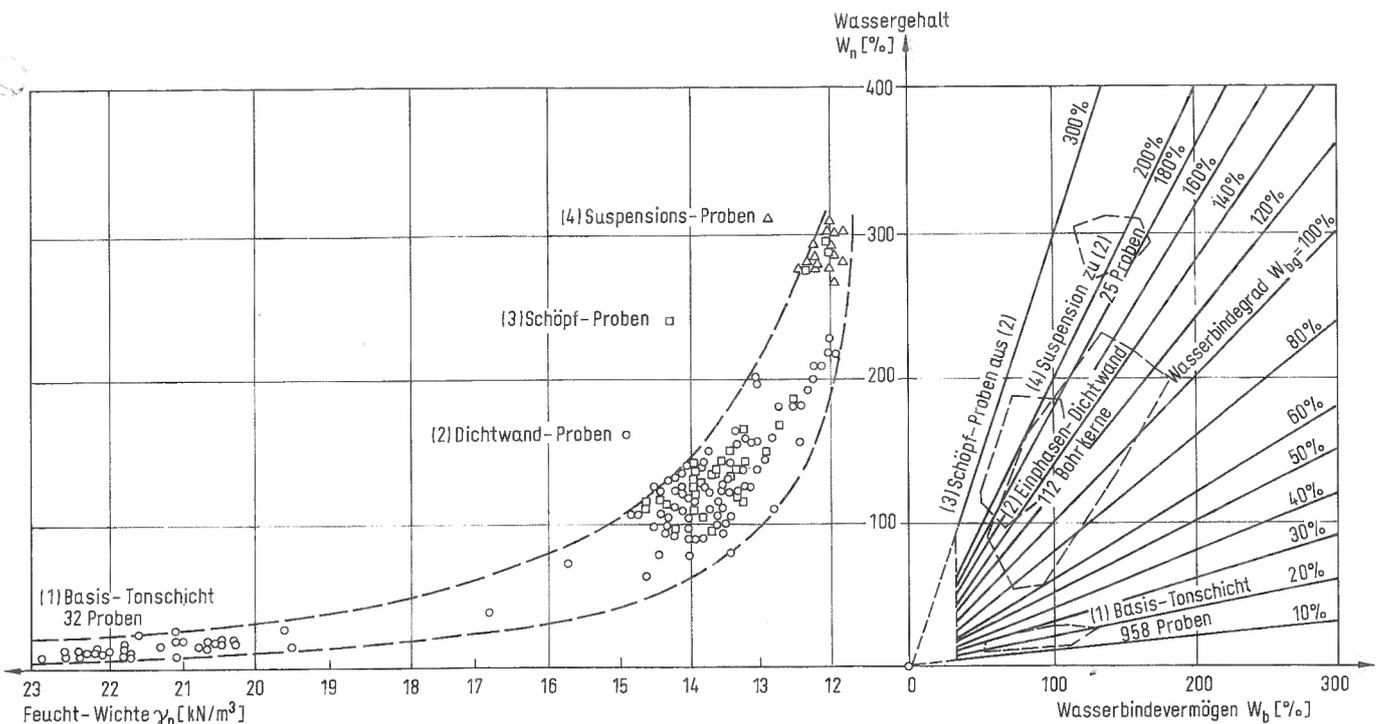


Bild 4. Stoff- und Zustandskennwerte mineralischer Abdichtungsböden und Abdichtungsstoffe einer Deponie

Tabelle 4. Untersuchungsbeispiele für Wasserbindevermögen W_b und Wasserbindegrad W_{bg}

W_b [%]	W_{bg} [%]	Boden (DIN 4023)	Ort/Alter, Bemerkung
Mineralische Böden [22]:			
37	43,0	U, s, feinsteinig	Siegen/Pleistozän, Siegtalbrücke
41	52,0	U, s, steif-weich	Essen/Pleistozän, thixotrop
42	70,0	U, fs, weich-breilig	Bötzingen/Pleistozän, thixotrop
42	54,3	S, u, dicht, naß	Darmstadt/Pleistozän, Mehlsand
42	42,9	U + S, dicht	Kleve/Holozän, Altrhein
44	47,0	U, fs, steif	Einbeck/Pleistozän, thixotrop
46,5	50,9	U, t + fs, steif-weich	Koblenz/Pleistozän, thixotrop
46,5	52,9	U, fs, steif-weich	Groß-Umstadt, Pleistozän, thixotrop
50	38,0	U, fs, steif	Traunreuth/Pleistozän, Moräne
51	46,3	U, t, steif	Bad Pyrmont/Pleistozän, thixotrop
52	32,5	Ton-Mergel, steif-halbfest	Wiesloch/Kreide
52	28,3	T, u, steif-halbfest	Rheine/Kreide, Eiszeitbelastung
54	39,6	U, t + s, steif	Berlin/Pleistozän, Eiszeitbelastung
54	52,2	U, t + fs, steif-weich	Heinsberg-Rhld/Pleistozän
59,5	34,6	U, t + fs, steif	Aschaffenburg/Pleistozän
62	33,7	T, u + fs, steif	Bünde/Pleistozän
63	34,1	T, u, steif	Oberstaufen/Tertiär, Gletscher-Belastung
65	27,8	Tonstein-Zersatz	Pirmasens/Buntsandstein
67	43,5	T, feinsteinig	Westerburg/Tertiär, Basaltzersatz
68	33,1	T, mergelig, steif-halbfest	Ingolstadt/Tertiär
70	37,2	T, u, steif-halbfest	Offenbach/Tertiär
72,5	28,5	T + U, s, halbfest	München/Tertiär, Flinz
73	33,3	T, s, steif-halbfest	Waltrop/Kreide, Tonmergel
73	47,3	T, u + fs, steif	Hof/Saale, Pleistozän
75	40,2	T, fs, steif	Frankfurt/Tertiär, Fernmeldeturm
76	38,9	T, u + s, steif	Lich/Tertiär, Laterit, Damm-Dichtungskern
80,5	28,3	T, u + s, steif	Frankfurt-Atzelberg/Tertiär, unverwittert
85	38,1	Ton-Mergel, steif-halbfest	Günzburg/Tertiär
89	17,4	T, u, halbfest-fest	Gießen/Tertiär, Schrumpftrocknung
90	35,6	T, u, steif-halbfest	Frankfurt/Tertiär, Senckenberghochhaus
94	27,2	T, fs, steif-halbfest	Bonn/Tertiär
106	22,7	T, fs, steif-halbfest	Baunatal/Tertiär
116	24,8	T, halbfest	Frankfurt/Tertiär, Sachsenhäuser Berg
127	49,6	T, fx, steif-weich	Rhön/Pleistozän, Rutschung, Gleitzone

der auf einer Dichtwand-Ringlänge von 2,6 km 958 Stichproben aus Entnahmetiefen zwischen 30 und 45 m untersucht worden sind [17]. Diese Tonschicht ist relativ gleichmäßig bis zu Wasserbindegraden zwischen 10 und 30 %, d. h. bis zu halbfest bis steifer Konsistenz konsolidiert. Die zugehörigen Feuchtwichten von 32 ungestörten Bohrproben aus dem Dichtwand-Einbindebereich liegen zwischen 19,5 und 22,9 kN/m³.

Im Vergleich hiermit wurde nach Bild 4 die Zement-Bentonit-Dichtmasse der Einphasen-Dichtwand, die nach

Tabelle 4. Fortsetzung

W_b [%]	W_{bg} [%]	Stoff/Dichtmasse	Ort/Bauteil, Bemerkung
Mineralische Stoffe [23]:			
38	0	Steinmehl-Füllstoff	Wien/Schmalwand
57	35,1	U, t + fs + Na-Bentonit-Basisdichtung	Reißkirchen/Deponie, $k \leq 10^{-11}$ m/s (Aceton)
58	0	Ziegelmehl	Messel/Ölschiefer-schlacke
66	75,4	Ca-Bentonit + Zement + Sand-Dichtmasse	Dreieich/Soilcrete-großversuch $k = 4 \cdot 10^{-10}$ m/s
66	114	Ca-Bentonit + Zement-Dichtmasse	Wien/Schmalwand $k = 7,7 \cdot 10^{-10}$ m/s (entmin. Wasser)
90	32,7	T, u + s Oberflächendichtung	Nieder-Ohmen/Deponie, Laterit $k = 5,7 \cdot 10^{-10}$ m/s (entmin. Wasser)
96	237	Ca-Bentonit + Zement-Dichtmasse	Malsch/2-Phasen-Dichtmasse $k = 3,4 \cdot 10^{-10}$ m/s (Prüfflüssigkeit)
101	209	Ca-Bentonit-Zement-Dichtmasse	Wien/Einphasen-dichtwand $k = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s (entmin. Wasser)
103	124	Na-Bentonit-Zement + Sand-Dichtmasse	Dreieich/Einphasen-dichtwand $k = 4 \cdot 10^{-10}$ m/s (Prüfflüssigkeit)
116	278	Na-Bentonit + Zement-Dichtmasse	Frau-Rombach/Einphasendichtwand, 56 Tage $k = 10^{-9}$ m/s (entmin. Wasser)
180	4,7	Ca-Bentonit, getrocknet	Malsch/Dichtwand

Durchmischung mit anstehendem Sandkorn und Abfiltration von Wasser im Schlitz erhärtet ist, durch die Zementbeigabe bei Wasserbindegraden zwischen 60 und 200 % stabilisiert (2). Die aus dem Dichtwandschlitz entnommenen Schöpfproben (3) konnten nicht im gleichen Maße Wasser abfiltrieren, da sie in Kunststoffbehälter abgefüllt wurden. Die Wasserbindegrade der erhärteten Proben liegen hier zwischen 120 und 260 %. Dies gilt in gleicher Weise für die Rückstellproben der Frischsuspension (4), die zwischen $W_{bg} = 170$ und 260 % erhärtet sind. Die ermittelten Feuchtwichten liegen zwischen 11,8 kN/m³ bei den Frisch-Proben und 11,9 bis 16,8 kN/m³ bei den Dichtwand- und Schöpfproben.

Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte für die zu mindestens 98 % wassergesättigten Proben waren folgende [17]:

- (1) Tonschicht-Proben $k = 10^{-10}$ bis 10^{-11} m/s
- (2) Dichtwand-Proben $k = 2 \cdot 10^{-9}$ bis $4 \cdot 10^{-10}$ m/s
- (3) Schöpf-Proben $k = 1,5 \cdot 10^{-9}$ bis $3 \cdot 10^{-10}$ m/s
- (4) Suspensions-Proben $k = 5 \cdot 10^{-9}$ bis $3 \cdot 10^{-10}$ m/s

Hieraus ist zu folgern, daß ein hoher Feststoffgehalt bzw. eine halbfest bis steife Konsistenz bei einem feinkörnigen tonmineralhaltigen Boden stets mit einer sehr geringen Wasserdurchlässigkeit verbunden ist. Aber auch bei niedrigem Feststoffgehalt erreichen tonmineralhaltige Dichtmassen in Verbindung mit einer Zementstabilisierung eine sehr gute Abdichtungswirkung. Diese ist um so besser, je größer die Wasserabfiltration vor dem Abbinden ist und je größer das Wasserbindevermögen ist.

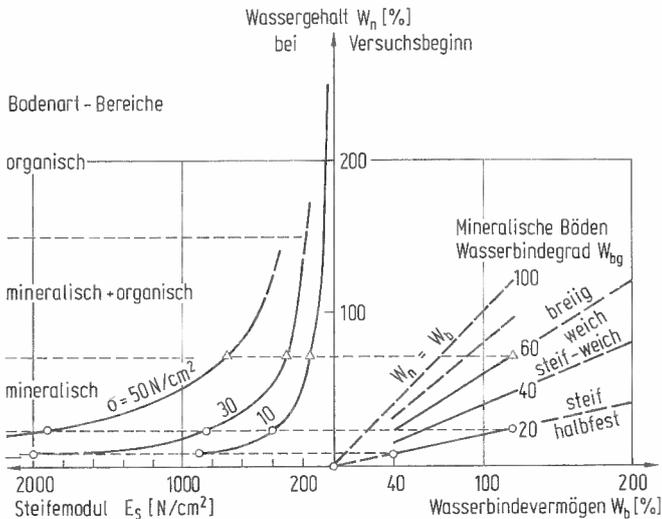


Bild 5. Zusammenrückbarkeit mineralischer und organischer Böden

4.2 Steifemodul, Winkel der inneren Reibung und Kohäsion

Aus 165 dem Zeitsetzungsverhalten nach störungsfrei verlaufenen Kompressionsversuchen wurde die Korrelation zwischen dem Wassergehalt bzw. Wasserbindegrad und der gemessenen Zusammendrückung in den einzelnen Laststufen ermittelt, hieraus Druck-Setzungs-Linien abgeleitet und daraus eine statistisch gesicherte Beziehung zum Steifemodul E_s für mineralische Böden gewonnen (Bild 5). Mit stärker wasserhaltigen organischen Böden konnte diese Beziehung für die Laststufe 10 N/cm² für Wassergehalte bis über 200% nahtlos erweitert werden. Bei Baugrundbeurteilungen haben sich danach Setzungsprognosen an Hand größerer W_n -Stichprobenzahlen im Vergleich mit dem üblichen Umfang an Kompressionsversuchen als treffsicherer erwiesen [22].

Bild 6 zeigt die Beziehung zwischen Zeitsetzungsverhalten und Wasserbindevermögen für mineralische Böden als stoffabhängiger Eigenschaft. Bild 7 gibt den generellen Zusammenhang zwischen Wasserbindevermögen W_b und Reibungswinkel sowie Wasserbindegrad W_{bg} und Kohäsion aus Rahmenscherversuchen wieder. Auch zwischen dem Wasserbindevermögen W_b und dem Gleitreibungswinkel ist eine Beziehung zu erwarten. Denn im Wasseraufnahmeversuch werden vorhandene Porenstrukturen bei der Pulverisierung einheitlich beseitigt. In ähnlicher Weise werden im Scherversuch mit Eintreten der Gleitreibung sedimentationsabhängige, bei der Konsolidation erhalten gebliebene Porenstrukturen zerstört.

4.3 Eignungsprüfung, Qualitätskontrolle

Für die kombinierte Abdichtung von Abwassersammlern in Trinkwasserschutzonen II sowie für Arbeitsraumabdichtungen gegen Kluftwasser wurden von zehn Lehmgruben mineralische Abdichtungsmaterialien auf Verdichtbarkeit und Abdichtungswirkung untersucht. Hierzu ist in Bild 8 der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt bei 92% Proctordichte und dem Wasserbindevermögen W_b bzw. dem Wasserbindegrad W_{bg} dargestellt. Die zugehörigen Durchlässigkeitsbeiwerte lagen stets unter $k = 0,5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Bei der Bauausführung konnte dann sowohl die Einbaufähigkeits-Beurteilung als auch die Qualitätskontrolle auf eine größere Stichprobenzahl von W_n/W_b - und Dichte-Bestimmungen in Verbindung mit einer kleineren Stichprobenzahl von k -Wert-Bestimmungen zuverlässig abgestellt werden. Bild 8 zeigt aber auch, daß die pleistozänen und tertiären

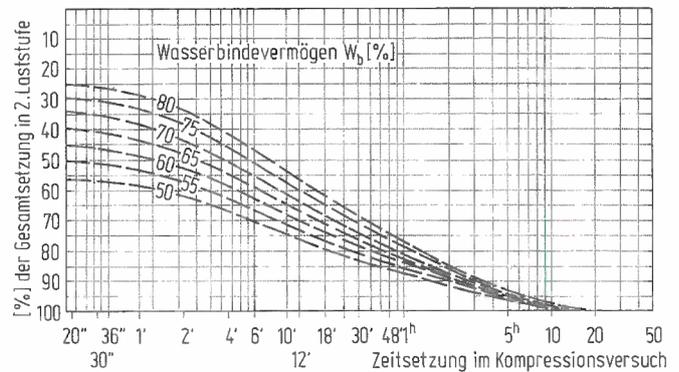


Bild 6. Zeitsetzungsverhalten mineralischer Böden

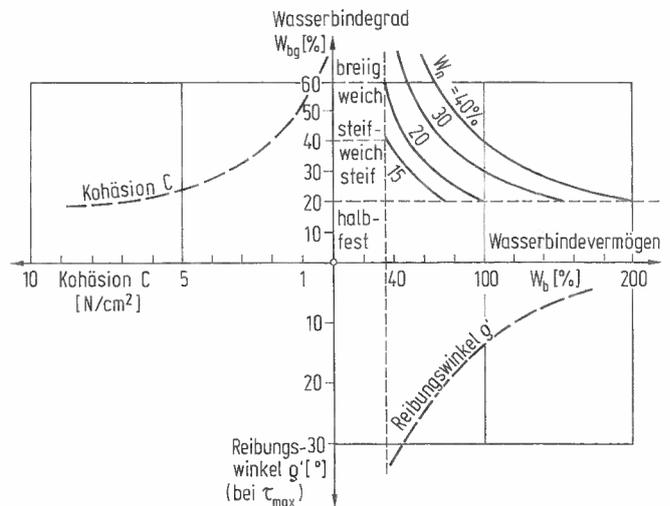


Bild 7. Scherfestigkeit mineralischer Böden (Mittelwerte)

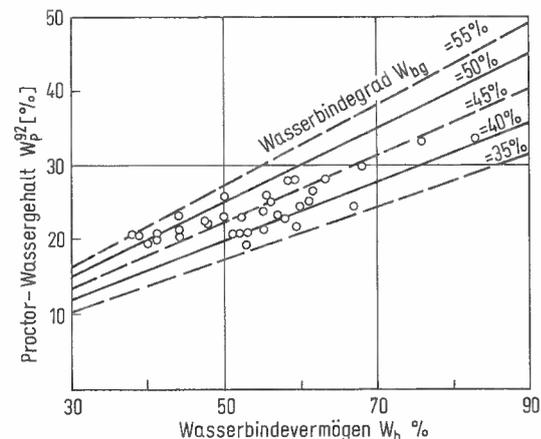


Bild 8. Proctor-Wassergehalt W_p^{92} von mineralischen Abdichtungsböden aus zehn Lehmgruben

Böden aus den zehn Lehmgruben bei 92% Proctordichte eine größere Variationsbreite des Wasserbindegrades zwischen $W_{bg} = 36$ und 55% besitzen. Dies ist nicht nur durch das unterschiedliche Wasserbindevermögen, sondern auch durch die unterschiedliche Kornverteilung bedingt und muß deshalb von Fall zu Fall mit berücksichtigt werden [22].

Gemäß Bild 9 wurde bei einer Sportanlage für das Erdplanum von sehr unterschiedlicher Bindigkeit und Konsistenz der von Kühn [21] mitgeteilte Zusammenhang zur Erdplanums-Befahrbarkeit auf die ermittelten Werte des Wasserbindevermögens W_b und Wasserbindegrads W_{bg}

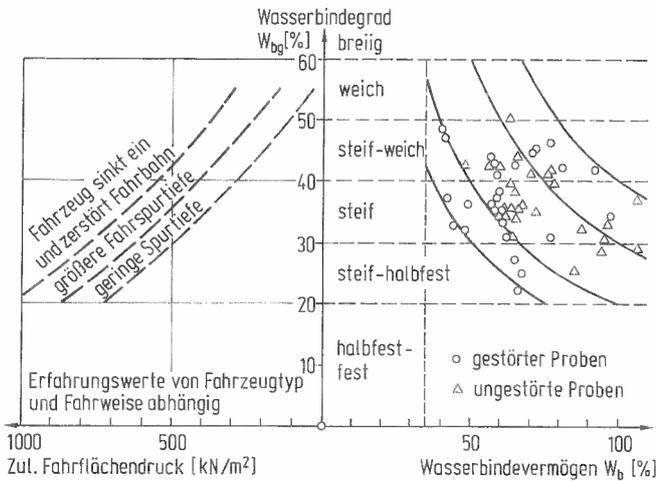


Bild 9. Fahrbahn-Mindestfestigkeiten und Reifenbefahrbarkeit mineralischer Erdplanien

übertragen. Danach konnten der Geräteinsatz und die Untergrundverbesserung auf vereinfachte Weise gesteuert werden. Diese Beziehung hat sich auch beim Straßen- und Autobahnbau in Hessen und Nordrhein-Westfalen bei der Beurteilung zahlreicher Erdlose seit 1960 bewährt [22], [23].

4.4 Rezeptur mineralischer Abdichtungsstoffe und chemische Abhängigkeiten

Sowohl *Endell* [11] als auch *Pichler* [12] hatten Mischungen von Quarzmehl, das nur ein Wasserbindevermögen von $W_b = 35\%$ besitzt, mit Tonmineralien von unterschiedlich hohem Wasserbindevermögen untersucht. Nach *Pichler*, bzw. Bild 3-3.1 in GDA-Empfehlung E3-1 [1] erreicht der untersuchte Ca-Bentonit ein Wasserbindevermögen von $W_b = 205\%$. Die Mischung aus 40% Bentonit und 60% Quarz erreicht im Versuch $W_b = 103\%$, während die Stoffrechnung den gleichen Wert ergibt:

$$\begin{aligned}
 &60\% \text{ Quarz, anteilig} && W_b = 0,6 \cdot 35 = 21\% \\
 &40\% \text{ Ca-Bentonit, anteilig} && W_b = 0,4 \cdot 205 = 82\% \\
 &&& \underline{W_b = 103\%}
 \end{aligned}$$

Bei Montmorillonit/Quarz-Mischungen ergibt die Mischungs-Rechnung gegenüber den Ergebnissen von *Pichler* stets niedrigere Werte, während dies nach den Ergebnissen von *Endell* umgekehrt ist.

Nach der hier vorliegenden Versuchserfahrung werden diese unterschiedlichen Ergebnisse bestätigt. D. h. das Wasserbindevermögen verändert sich nicht immer prozentual zu den mineralischen Stoffanteilen. Dies wird darauf zurückgeführt, daß bei der Mischung verschiedener mineralischer Stoffe die Wasseraufnahmetendenz der Stoffkomponenten sowohl verstärkt als auch abgemindert werden kann. Die jeweils gegebenen Abhängigkeiten sind deshalb zweckmäßigerweise durch Wasseraufnahmeversuche mit verschiedenen Mischungsverhältnissen festzustellen. Für Rezepturen nach GDA-Empfehlung E3-1 kann dann der zugehörige Wert des Wasserbindevermögens sowohl von der Mischung als auch von den Stoffkomponenten zur Qualitätskontrolle der Stofflieferungen und des fertig gemischten Abdichtungsstoffes auf der Baustelle verwendet werden. Dies gilt sowohl für mineralische Böden mit Bentonitvergütung als auch für zementgebundene Dichtwände.

Bei der Prüfung chemischer Abhängigkeiten im Sinne des Abschnittes 2.2 zeigen die bisherigen Versuchserfahrungen, z. B. nach der Proben-Durchströmung mit chemisch

aggressiver Prüfflüssigkeit, daß das teilweise Herauslösen einer Stoffkomponente, z. B. von Kalk aus einer Dichtwandprobe, nicht unbedingt gleichbedeutend ist mit dem Herabsetzen des Wasserbindevermögens der Probe. Auch muß hiermit nicht eine Erhöhung der Durchlässigkeit verbunden sein [17]. Hier ist parallel zu den tonmineralischen Untersuchungen nach den GDA-Empfehlungen E3 noch weitere bodenphysikalisch orientierte mineralogische Forschung erforderlich. Hierbei sind für die geotechnische Praxis möglichst einfache Entscheidungskriterien zu entwickeln.

Abschließend ist an Hand der in Abschnitt 4 gezeigten Anwendungsbeispiele festzustellen, daß sich der Wasseraufnahme-Versuch sowohl für tonmineralologisch als auch für chemisch orientierte bodenphysikalische Untersuchungen auf einfache und vielfältige Weise anwenden läßt.

Literatur:

- [1] *Jessberger, H. L., et. al.*: Empfehlungen des Arbeitskreises AK 11 „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Bautechnik 64 (1987), H. 5, S. 289-303.
E3 Empfehlungen zu geotechnischen Eignungsprüfungen
E3-1 Eignungsprüfung mineralischer Oberflächen- und Basisabdichtungen (gültige Empfehlung 1987)
E3-2 Eignungsprüfung mineralischer Dichtwandmassen (Entwurf 1987)
E3-3 Tonmineralogische Charakterisierung mineralischer Basisabdichtungen (Entwurf 1987)
E3-4 Charakterisierung von Sickerwasser hinsichtlich der chemischen Beanspruchung mineralischer Abdichtungsmaterialien (Entwurf 1987)
- [2] *Neff, H. K.*: Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslin-Gerätes. Bautechnik 39 (1959), H. 11, S. 415-421.
- [3] *v. Soos, P.*: Eigenschaften von Boden und Fels, ihre Ermittlung im Labor. In: *Smoltczyk, U.* (Hrsg.) Grundbautaschenbuch, 3. Auflage, Teil 1, S. 59-114. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1980.
- [4] *Jessberger, H. L.*: Grundlagen und Anwendung der Bodenstabilisierung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1967.
- [5] *Krenkler, K.*: Chemie des Bauwesens, Band 1 Anorganische Chemie. Berlin: Springer-Verlag 1980.
- [6] *Brinch-Hansen, J., und Lundgren, H.*: Hauptprobleme der Bodenmechanik. Berlin: Springer-Verlag 1960.
- [7] *Hilbert, F.*: Chemisch-physikalische Strukturveränderung von Schluff- und Tonböden und Physikalische Chemie der Rutschungen in Schluff- und Tonböden. In: *Veder, Ch.* (Hrsg.) Rutschungen und ihre Sanierung. Wien, New York: Springer-Verlag 1979, S. 20-31 und S. 186-219.
- [8] *Schetelig, K.*: Hydraulische Filterstabilität in Damm und Untergrund unter Berücksichtigung der mineralogischen Zusammensetzung des Feinanteils. Wasserwirtschaft 77 (1987), S. 334-337.
- [9] *Düllmann, H.*: Schadensanalyse mineralischer Deponiebasisabdichtungen. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Ministers für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Unveröffentlichter Abschlußbericht 1987.
- [10] *Enslin, O.*: Über einen Apparat zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme an quellbaren und porösen Stoffen. Chemische Fabrik 6 (1933), S. 147.
- [11] *Endell, K.*: Die Quellfähigkeit der Tone im Baugrund und ihre bautechnische Bedeutung. Bautechnik 19 (1941), S. 201.
- [12] *Pichler, E.*: The expansion of soils due to the presence of clay minerals as determined by the adsorption test. Proc. 3. Intern. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 1 (1953), S. 43.
- [13] *Jessberger, H. L.*: Flüssigkeitsaufnahme, Bildsamkeit und Sedimentationsstabilität von Ton. Diss. TH München (1960).
- [14] *Neff, H. K., und Walter, H.*: Bodenmechanische und chemische Untersuchungen an der Zement-Bentonit-Schlitzwand zum Grundwasserschutz bei der Großdeponie Dreieich-Buchschlag der Stadt Frankfurt am Main. Fachtagung Deponietechnik der Südchemie AG in Hamburg 1983.
- [15] *Schmitt, G.-P.*: Mineralische Abdichtungen durch Bentonit-Tongemische mit natürlichen Böden. Fortschritte der Deponietechnik 1983, S. 159-182. Umweltbundesamt Berlin und ergänzende Mitteilung des Verfassers.

- [16] Reuter, E., und Meseck, H.: Die Beeinflussung der Quelleigenschaften handelsüblicher Bentonite durch chemische Lösungen. Wasser und Boden 1986, S. 563-567.
- [17] Neff, H. K.: Großdeponie Dreieich-Buchsschlag. Baugrundtagung Düsseldorf 1984, S. 205-257.
- [18] Neff, H. K., und Walter, H.: Demonstration des nachträglichen Grundwasserschutzes einer Großdeponie durch seitliche Abdichtung und durch Oberflächenabdeckung bei der Abfalldeponie Dreieich-Buchsschlag. 2. Forschungszwischenbericht Gesamtprojekt 1985/86. BMFT-Förderungskennzeichen 143 0260 I 1.
- [19] Neff, H. K.: Sanierungsergebnisse aus der Sicht des Sicherungskonzeptes zur Basis- und Oberflächenabdichtung der Deponie Dreieich-Buchsschlag. Symposium Deponiebauwerke Frankfurt 1987. Hungen: Eigenverlag ETN Erdbaulaboratorium Dr. Tropp - Dipl.-Ing. Neff und Partner 1987.
- [20] Prinz, H.: Abriß der Ingenieurgeologie. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag 1982.
- [21] Kühn, G.: Der gleislose Erdbau. Berlin: Springer-Verlag 1956.
- [22] Neff, H. K., und Tropp, W.: Unveröffentlichte geotechnische Gutachten zur Gründung von Hoch- und Tiefbauten sowie zum Erdbau bei Einschnitten, Dämmen und Abdichtungsschürzen 1959 bis 1980.
- [23] Neff, H. K., Walter, H., und Tropp, J.: Unveröffentlichte geotechnische Gutachten über Laboruntersuchungen an Basis- und Oberflächenabdichtungsmaterialien der Deponien Dreieich, Reiskirchen, Nieder-Ohmen, Malsch und Wien, der Staudämme Guckasee, Flieden, Frau-Rombach und Ruppertsburg, sowie der Teichkläranlagen Flieden, Münzenberg, Schlitz, 1981 bis 1987.

Rechtsfragen des Ingenieurs

Einbeziehung Allgemeiner Geschäftsbedingungen in Vertragsverhältnis

Nach § 2 Gesetz über Allgemeine Geschäftsbedingungen werden Allgemeine Geschäftsbedingungen nur dann Bestandteil eines Vertrages, wenn der Verwender bei Vertragsabschluß die andere Vertragspartei ausdrücklich oder, wenn ein ausdrücklicher Hinweis nur unter unverhältnismäßigen Schwierigkeiten möglich ist, durch deutlich sichtbaren Aushang am Ort des Vertragsabschlusses auf sie hinweist und dem anderen Vertragspartner die Möglichkeit verschafft, in zumutbarer Weise von ihrem Inhalt Kenntnis zu nehmen.

Bei dieser Rechtslage hat sich das Oberlandesgericht Hamm im Urteil vom 22. 9. 1986 - 17 U 214/85 - mit der Frage befaßt, ob Allgemeine Geschäftsbedingungen dann Vertragsbestandteil werden, wenn sie bei Vertragsabschluß nicht ausdrücklich erwähnt worden sind, der Auftraggeber diese Geschäftsbedingungen dem Auftragnehmer aber zusammen mit den Ausschreibungsunterlagen übersandt hatte. Nachdem der Auftragnehmer jedoch statt des ausgeschriebenen Einheitspreisvertrages einen Pauschalpreis angeboten hatte und der Auftrag hierüber auch zustande gekommen war, hätte es einer besonderen Bezugnahme des Auftraggebers auf seine Geschäftsbedingungen bedurft, wenn er diese auch dem nunmehr abgeschlossenen Pauschalpreisvertrag zugrunde legen wollte.

So konnte der Auftraggeber nicht unter Berufung auf seine Allgemeinen Geschäftsbedingungen eine Vertragsstrafe einbehalten. Diese Möglichkeit hätte er aber nicht einmal gehabt, wenn die Allgemeinen Geschäftsbedingungen Vertragsinhalt geworden wären. Er hatte sich nämlich die Vertragsstrafe bei Abnahme der Leistung nicht vorbehalten. Er meinte, nach den Geschäftsbedingungen würde die Vertragsstrafe auch dann fällig, wenn der Auftraggeber die verzögerte Leistung ohne Vorbehalt annehme. Eine solche Regelung ist jedoch unwirksam.

Das Erfordernis des Vorbehalts der Vertragsstrafe in Allgemeinen Geschäftsbedingungen kann nicht abbedungen werden, weil sich eine solche Vereinbarung zu sehr vom gesetzlichen Leitbild entfernt. Anderenfalls bliebe der Auftragnehmer bis zum Verjährungsablauf im Unklaren darüber, ob und gegebenenfalls wann der Auftraggeber noch auf den Strafanspruch zurückgreifen werde. Das kann bei gerechter Abwägung der widerstreitenden Interessen nicht hingenommen werden. Folglich war ein etwaiger Vertragsstrafenanspruch mangels Vorbehaltserklärung bei der Leistungsabnahme erloschen.

Weiter konnte der Auftraggeber keinen Skontoabzug vornehmen, selbst wenn seine Allgemeinen Geschäftsbedingungen Vertragsbestandteil geworden wären. Er hatte zunächst nicht fristgerecht geleistet, weiter aber überhaupt nur in Form der Hingabe eines Wechsels, worin keine Zahlung gesehen werden konnte, da Skonto üblicherweise nur gewährt wird, um eine Barzahlung, mindestens aber eine Scheckzahlung zu erreichen. Schließlich entfiel der Skontoabzug auch deshalb, weil der Auftraggeber nicht den vollen Rechnungsbetrag, sondern wegen der vermeintlichen Vertragsstrafe einen gekürzten Betrag gezahlt hatte.

Dr. - tt -

Abwicklung eines nur teilweise ausgeführten Werkvertrages

Wenn der Werkvertrag während der Ausführungszeit vom Auftraggeber wegen bestimmter Mängel gekündigt wird, und ein Drittunternehmer die Beseitigung dieser Mängel übernimmt, so kann der Auftraggeber grundsätzlich die Erstattung dieser Fremdnachbesserungskosten vom Erstunternehmer fordern. Voraussetzung dafür ist aber, daß der Erstunternehmer sein Recht verloren hat, Mängel seiner Werkleistung selbst zu beseitigen. Dieses Recht verliert der Erstunternehmer regelmäßig nur, wenn er es innerhalb einer ihm

vom Auftraggeber gesetzten angemessenen Frist nicht ausübt. Erst danach kann der Auftraggeber auf Kosten des Erstunternehmers fremdnachbessern lassen. Ebenso ist es, wenn der Auftraggeber nach § 8 Nr. 3 VOB/B dem Auftragnehmer den Auftrag entzieht.

Die Fristsetzung zur Mängelbeseitigung ist nur ausnahmsweise entbehrlich. Wenn der Erstunternehmer sich geweiigert hat, die Arbeiten solange nicht fortzusetzen, bis der Auftraggeber eine weitere Abschlagszahlung geleistet hat, läßt sich daraus nicht herleiten, er wäre nach Fristsetzung nicht zur Mängelbeseitigung bereit gewesen. Unterbleibt aber die gebotene Fristsetzung zur Mängelbeseitigung, so kann der Auftraggeber vom Erstunternehmer keine Erstattung der Fremdnachbesserungskosten fordern. Entsprechendes gilt für die Mehrkosten, die bei der Vollendung des Werkes entstehen. Auch sie können nur geltend gemacht werden, wenn der Auftraggeber dem Erstunternehmer den Auftrag wirksam entzogen hat.

Schließlich gilt Entsprechendes für eine vom Auftraggeber behauptete Minderung des Wertes des Gebäudes. Dies gilt für den technischen oder merkantilen Minderwert, der trotz erfolgreicher Mängelbeseitigung an dem erstellten Werk verbleibt, wenn der Auftrag für den Drittunternehmer modifiziert worden ist und dadurch anders nachgebessert worden ist. Dieser Minderwert wäre nicht entstanden, wenn der Erstunternehmer Gelegenheit zur eigenen Mängelbeseitigung bekommen hätte. Wird aber die vorgeschriebene Aufforderung zur Mängelbeseitigung unterlassen und kann sich der Erstunternehmer darauf berufen, daß sie ihm hätte erteilt werden müssen, kann der Auftraggeber keine Ansprüche aus allen Folgen herleiten, die durch eigene Nachbesserung abzuwenden der Erstunternehmer nicht einmal Gelegenheit erhalten hatte.

Zu diesem Ergebnis ist der Bundesgerichtshof im Urteil vom 8. 10. 1987 - VII ZR 45/87 - gekommen. Dr. O.

