

# **INAUGURAL - DISSERTATION**

**zur Erlangung der Doktorwürde  
der  
Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät  
der  
Ruprecht - Karls - Universität  
Heidelberg**

**vorgelegt von**

**Diplom-Geologe Wolfgang Hölzer**

**aus Bruchsal**

**2000**

# **Die Bodenverfestigung feinkörniger, bindiger Böden durch Zusatz von Wasserglas-Soda- Gemischen**

## **Untersuchungen an der Bodenfließgrenze**

Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Dachroth  
Prof. Dr. Hans J. Lippolt

Tag der Disputation: 20.12.2000

## **Vorwort**

Bei allen nachstehend Genannten möchte ich mich für die Unterstützung bei dieser Arbeit herzlich bedanken:

Bei Prof. Dr. Wolfgang Dachroth für die stete Ansprechbarkeit und Diskussionsbereitschaft, die bei der Anfertigung dieser Arbeit sehr geholfen hat.

Bei Herrn Prof. Dr. Hans J. Lippolt, für seine tatkräftige Unterstützung, der freundlicherweise das Korreferat übernommen hat.

Bei Herrn Prof. Dr. German Müller und Dr. Alfred Yahya für die Proben aus Norddeutschland.

Meiner Kollegin Dipl.-Geol. Elke Schwöbel danke ich für ihre Unterstützung bei den qualitativen Analysen.

Bei Herrn Andreas Kettenhofen und Frau Anja Lindner von der Firma Villeroy & Boch für die Lieferung von Rohstoffproben und deren chemischen Analysen.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1. Einleitung</b>	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
<b>2. Bodenfestigkeit und ihre Veränderung</b>	6
2.1 Bodenfestigkeit	6
2.2 Anlässe zur Änderung der Bodenfestigkeit	7
2.3 Verfahren der Bodenfestigkeitsänderung	8
2.4 Besonderheiten des Hydratonverfahrens	16
<b>3. Untersuchungsmethodik und Ausführung</b>	16
<b>3.1 Methoden zur Probenbeschreibung</b>	17
3.1.1 Wassergehalt	18
3.1.2 Kornverteilung	19
3.1.3 Konsistenzgrenzen	21
3.1.4 Mineralzusammensetzung (aus Röntgenbeugung)	26
<b>3.2 Methoden zur Kontrolle der Bodenfestigkeit</b>	29
3.2.1 Kegelwiderstand als Vergleichswert zur undränierten Scherfestigkeit	30
3.2.2 Scherfestigkeit - dräniert	32
<b>4. Proben, Experimente, Ergebnisse</b>	34
4.1 Proben	34
4.2 Experimente	37
4.3 Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen	40
4.4 Ergebnisse der Untersuchung zur Bodenverfestigung	47
4.4.1 Reaktion des Bodens bei Natriumkarbonatzusatz	47
4.4.2 Reaktionen bei Wasserglaszusatz	49
4.4.3 Reaktionen bei Zusatz von Wasserglas und Kalziumchlorid	50
4.4.4 Reaktionen bei Zusatz von Wasserglas und Natriumchlorid	51
4.4.5 Reaktionen bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen	52
4.4.6 Der optimale Zusatz von Wasserglas und Soda bei dem Wassergehalt der Fließgrenze	55
4.4.7 Untersuchungen des zeitlichen Ablaufs der Verfestigung nach Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen	60
4.4.8 Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Verfestigung durch Wasserglas-Soda-Gemische	62

	65
<b>4.5 Tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Verfestigungsexperimente</b>	
4.5.1 Leicht bis mittelplastische Tone	65
4.5.2 Ausgeprägt plastische Tone und Tone mit organischen Beimengungen	66
4.5.3 Grobe Schluffe, lößähnliche Böden und bindige Sande	67
4.5.4 Ergebnisse der Verfestigung aller untersuchten Proben	68
<b>5. Diskussion der Ergebnisse</b>	69
<b>5.1 Abhängigkeit der Verfestigung von der Aktivitätszahl</b>	69
<b>5.2 Abhängigkeit von der Bodenzusammensetzung</b>	71
5.2.1 Abhängigkeit von der Bodengruppe nach DIN 18196	71
5.2.2 Abhängigkeit vom Tongehalt	73
5.2.3 Abhängigkeit von der Art der Tonminerale	74
5.2.4 Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Fließgrenze	83
5.2.5 Schlußfolgerungen aus den durchgeführten Verfestigungsversuchen	86
<b>5.3 Klassifizierungen der Böden nach ihrer Eignung für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen</b>	87
5.3.1 Geeignete Böden	87
5.3.2 Bedingt geeignete Böden	90
5.3.3 Ungeeignete Böden	91
5.3.4 Eignungsprüfungen	91
5.3.5 Qualitätsanforderungen an zu verfestigende Böden	93
<b>6. Mögliche Anwendungen des Hydratonverfahrens</b>	97
6.1 Anwendungssituationen	97
6.2 Historische Anwendungen	98
6.3 Applikation der Zusätze (Umsetzung der Laborexperimente in Feldversuche)	99
6.4 Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Anwendung und Instandhaltung	100
6.5 Ökologische Aspekte	102
<b>7. Zusammenfassung</b>	105
<b>8. Literaturverzeichnis</b>	109
<b>9. Anhang</b>	115



# 1. Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Bindige (haftende) Böden nach DIN 18196 ändern mit dem Wassergehalt ihre Zustandsform. Sie sind bei hohen Wassergehalten breiig und gehen mit abnehmendem Wassergehalt in plastische und schließlich in halbfeste bis feste Zustandsformen über. Die Kenntnis der Fließ- und Ausrollgrenze ermöglicht zusammen mit dem natürlichen Wassergehalt  $w$  eine zahlenmäßige Aussage über den Zustand und damit über die Festigkeit eines Bodens (PRINZ, 1997).

Durch die Zustandsänderung bindiger Böden infolge steigenden Wassergehaltes können Probleme für die Bautechnik auftreten, die eine Anwendung der chemischen Bodenverfestigung wichtig und sinnvoll machen.

1. Durch Einwirkung von Witterung und Verkehr können Erdmassen aufgelockert werden. Durch den Zusatz von chemischen Zuschlagstoffen, wie z. B. beim "Hydraton"-Verfahren, können diese Erdmassen wieder verfestigt werden.

2. Bei den Bauaufgaben des Erd- und Grundbaus wirken Kräfte auf den Untergrund und bewirken eine Verformung. Durch den Zusatz von chemischen Zuschlagstoffen, wie z. B. beim "Hydraton"-Verfahren kann der Untergrund verfestigt werden, damit die Verformung unter der Last möglichst gering gehalten wird.

Beim Zusatz chemischer Zuschlagstoffe sind bestimmte Eigenschaften von bindigen Böden zu berücksichtigen.

Eigenschaften von bindigen Böden, die bei der Verfestigung mit chemischen Zuschlagstoffen zu Schwierigkeiten führen können, sind:

- unzureichender Anteil an reaktionsfähigem Material (KEIL, 1958)
- Inhomogenität der mineralogische Zusammensetzung (KEIL, 1958)
- geringe Durchlässigkeit (HURLEY & THORNBURN, 1969)
- nicht injezierbarer Porenraum -gute Durchmischung unmöglich-  
(HURLEY & THORNBURN, 1969)
- Abhängigkeit der Formbeständigkeit (Festigkeit) vom Wassergehalt  
(BLINDE & STETZLER, 1981)
- Quellung (MADSEN & MÜLLER-VONMOOS, 1988)

## **1.2 Zielsetzung der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist es, eine Methode zur Eignungsprüfung von bindigen Böden für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen zu entwickeln. "Wasserglas" heißen wässrige Lösungen von Alkalisilikaten. Als mineralischer Leim, wird Wasserglas zum Konservieren von Eiern, zum Verkleben von Glas, als Flammschutzmittel usw. verwendet (LATSCHA & KLEIN, 1978). Die Dichte von Wasserglas liegt etwas höher als die von Wasser und beträgt je nach Silikatgehalt 1,2-1,4 g/ml.

Soda (Natriumkarbonat) kommt in der Natur in einigen Salzen, Mineralwässern, in der Asche von Algen und Tangen vor und wird z. B. in der Seifen-, Waschmittel- und Glasindustrie verwendet (LATSCHA & KLEIN, 1978).

Die Eignungsprüfung soll Auskunft über die Anwendbarkeit der Verfestigung durch Wasserglas-Soda-Gemische sowie den Grad der Verfestigung geben. Die vom Wassergehalt abhängige Instabilität bindiger Böden unter ungünstigsten Bedingungen soll eingeschränkt werden.

Schon in den 50er-Jahren experimentierte KARL KEIL auf dem Gebiet der Bodenverfestigung durch Wasserglas-Soda-Gemische und ließ sich 1953 ein Verfahren patentieren, das aufgrund von Fehlanwendungen bald in Verruf geriet (K. KEIL, Patentschrift 2929 der Deutschen Demokratischen Republik 1953). Bei diesem Verfahren wurden Wasserglas  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  und Soda  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  unter dem Namen "Hydraton" verwendet. Das Verfahren wurde in der ehemaligen DDR mehrmals erfolgreich angewendet (JÄNKE, 1958). Eine Übersicht bezüglich der historischen Anwendung ist in Kapitel 6.2 dargestellt.

Bei zwei Bauprojekten stellten sich Schäden ein, die auf ein Versagen des Verfahrens zurückgeführt wurden (KÖHLER, 1957). Daraus wurde geschlossen, daß es nur eingeschränkt angewendet werden kann.

Nach KEIL (1958) wurde das Verfahren an folgenden Beispielen falsch angewendet:

Bei der Hafenbeckenabdichtung des Wendehafenbeckens-Stalinstadt im Sommer 1953 wurde zur Verfestigung ungeeignetes Material verwendet. Anstelle von geeignetem Ton wurde Schluff verwendet. Daher erhöhte sich die Durchlässigkeit des Beckens innerhalb eines Jahres um den Faktor 10000, wonach eine genügende Dichte der Hafenbeckenabdichtung nicht mehr gegeben war.

Beim Bau des Staudamms "Kalte Bode" im Oberharz wurde ein mit einer Plastizitätszahl von 9,7 ungeeignetes, überwiegend schluffiges Material eingesetzt, wonach ein Teil des Dichtungsmaterials einschließlich der Deckschichten nach starken Regenfällen abrutschte.

Die Aussagen, die KEIL in seinen Werken über die Eignung des Bodenmaterials machte, waren zu ungenau (vgl. Kapitel 5.3.5 Qualitätsanforderungen an zu verfestigende Böden). Für Verfestigungszwecke muß nach KEIL "ein aktivierbarer Ton mit einer Plastizitätszahl über 20 sowie angemessenem Wassergehalt" verwendet werden. Durch welche Tonminerale dieser "aktivierbare Ton" charakterisiert ist und welche Festigkeit bei unterschiedlich plastischen Tonen bei hohen Wassergehalten möglich ist, wurde von ihm nicht geklärt.

STRIEGLER (1963) untersuchte die Auswirkungen des Chemikalgemisches in Kombination mit "geeigneten Tonen" als Zuschlagstoff um "nicht aktivierbare Böden" zu verfestigen. Seine Ergebnisse zeigten, daß die sichere Verwendung des Hydratonverfahrens bei Mischböden möglich ist.

Wie das "Hydraton"-Verfahren bei sehr hohen Wassergehalten im Bereich der Fließgrenze sowie bei unterschiedlicher Plastizität tonhaltiger Böden funktioniert wurde nicht untersucht. Eine schnelle Verfestigung, wie sie das von KEIL entwickelte Verfahren ermöglicht, ist bei durch Hochwasser und Starkniederschläge aufgeweichten Böden ein großer Vorteil. Daher erscheint es sinnvoll und wichtig den Anwendungsbereich des Verfahrens nach KEIL besser zu kennen. Deshalb ist die Aufgabe der hier vorliegenden Forschungsarbeit das "Hydraton"-Verfahren auf seine Funktionsfähigkeit hin zu untersuchen, um zu klären, ob es möglich ist, bindige Böden effektiv und schnell zu verfestigen. Besondere Beachtung soll dem Stadium gelten, bei dem die Bodenfließgrenze erreicht oder überschritten wird.

Nach ATTERBERG (1911) charakterisiert sie den Übergang eines Bodens vom flüssigen in den plastischen Zustand. Die Quantifizierung der Festigkeit und der Festigkeitsabfall bei Wasserzusatz gehören zu den wichtigsten Beurteilungskriterien bindiger Böden. Fehlbewertungen können zu Versagensfällen, wie Rutschungen und Erosionsschäden führen.

Dazu werden fünf Themen bearbeitet:

1. Verfestigung an der Fließgrenze
2. Eignungsprüfungen unterschiedlicher bindiger Böden
3. Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Verfestigung
4. Auswirkungen ähnlicher Chemikalien auf bindige Böden
5. Ermittlung des optimalen Chemikalienzusatzes an der Fließgrenze

Von den Ergebnissen hängt der künftige Einsatz des "Hydraton"-Verfahrens ab. Bei positivem Gesamtergebnis können in Bewegungen geratene Bodenmassen bearbeitet und das immobilisierte Material sofort wieder eingebaut werden. Für das Verfahren geeignetes abrutschendes Material von Böschungen, Dämmen und Deichen könnte nach Behandlung sofort wieder zu Reparatur- und Dichtzwecken ohne Verlust der Stützfunktion verwendet werden. Dadurch könnten wichtige Transportwege nach kurzer Zeit wieder befahrbar werden.

## **2. Bodenfestigkeit und ihre Veränderung**

Der Begriff "Boden" wird in der vorliegenden Arbeit, abweichend von der bodenkundlichen Begriffswelt, im bautechnischen Sinn gebraucht als branchenübliche Sammelbezeichnung aller Lockergesteine und von lockergesteinsartig verwitterten Festgesteinen (PRINZ, 1997).

Die Unterteilung der Lockergesteine erfolgt nach der Korngrößenverteilung sowie der Plastizität bzw. Fließgrenze, bei organogenen Lockergesteinen nach der geologischen Entstehung.

Mineralische Lockergesteine werden unterschieden in

- nichtbindige (kohäsionslose, rollige) Lockergesteine und
- bindige (kohäsive, haftende) Lockergesteine

mit ihren Übergangsformen, wie bindige Sande und Kiese, bei den mineralischen Lockergesteinen mit organischen Beimengungen zur Unterscheidung organisch durchsetzter nichtbindiger und bindiger Lockergesteine, bei den organogenen mit mineralischen Beimengungen zur Trennung in Braunkohle, Torfe, Mudden und Kreide. Bindige Lockergesteine werden in leicht-, mittel- und ausgeprägt plastische Böden unterschieden (KLENGEL & WAGENBREDT, 1989).

### **2.1 Bodenfestigkeit**

Das Festigkeitsverhalten der Lockergesteine wird entscheidend durch Wasser beeinflusst. Im wesentlichen beruht die Festigkeit auf der Reibung und der wasserabhängigen Haftfestigkeit (Kohäsion, Bindigkeit) zwischen den Mineralkörnern. Ursache der Bindigkeit sind Oberflächenkräfte, die mit zunehmender Kornfeinheit und mit dem Gehalt an Tonmineralen zunehmen.

Tonminerale können infolge ihres Gitteraufbaus bedeutend mehr Wasser als andere Silikatminerale gleicher Korngröße binden, ehe sie untereinander den Zusammenhalt verlieren. Daraus läßt sich ableiten, daß die Menge an Wasser, die notwendig ist, um eine bestimmte Menge eines Mineralgemischs - also eines bestimmten bindigen Lockergesteins - von der ausgetrockneten (festen) über die knetbare (plastische) in die flüssige Zustandsform zu überführen, eine Funktion der im Mineralgemisch wirksamen Oberflächenkräfte ist (KLENGEL & WAGENBREDE, 1989).

## **2.2 Anlässe zur Änderung der Bodenfestigkeit**

Folgende Punkte können eine Verfestigung des Bodens erforderlich machen:

1. Die Erhöhung der Stabilität (z. B. von Böschungen und Hängen) kann durch eine Bodenverfestigung erreicht werden.
2. Die Erhöhung der Tragfähigkeit (bessere Lastaufnahme des Untergrundes) kann durch eine Bodenverfestigung erreicht werden.
3. Die Verringerung der Durchlässigkeit (Boden als Abdichtung) kann durch eine Bodenverfestigung (Bodenverdichtung) erreicht werden.

Folgende Punkte können eine Verflüssigung des Bodens erforderlich machen:

1. Erniedrigung der Viskosität bei bestimmten Prozessen in der keramischen Industrie und Gießereitechnik.
2. Einspülen von mineralischen Dichtungen im Deponiebau.

## 2.3 Verfahren der Bodenfestigkeitsänderung

### 1. Mechanische Verfahren

Alle mechanischen Verfahren beruhen auf dem Prinzip der Bodenverdichtung durch entsprechende Geräte. Ziel der Verdichtungsarbeit ist die optimale Dichte bei optimalem Wassergehalt (Proctordichte nach DIN 18127).

### 2. Chemische Verfahren

In der Bautechnik gibt es verschiedene Möglichkeiten den Boden durch Chemikalien zu verfestigen. Dabei kommen auch ähnliche Chemikalien, wie beim "Hydratonverfahren" zur Verwendung:

#### A. JOOSTEN - Verfahren

Beim JOOSTEN - Verfahren (1926 entwickelt) werden über Injektionen grobkörnige Böden durch Aushärtung eines Stützskelettes im Porenraum sowie durch Verkittung der Körner verfestigt. Die Injektionslösungen bestehen aus Kalziumchlorid und Wasserglas (PRINZ, 1997).

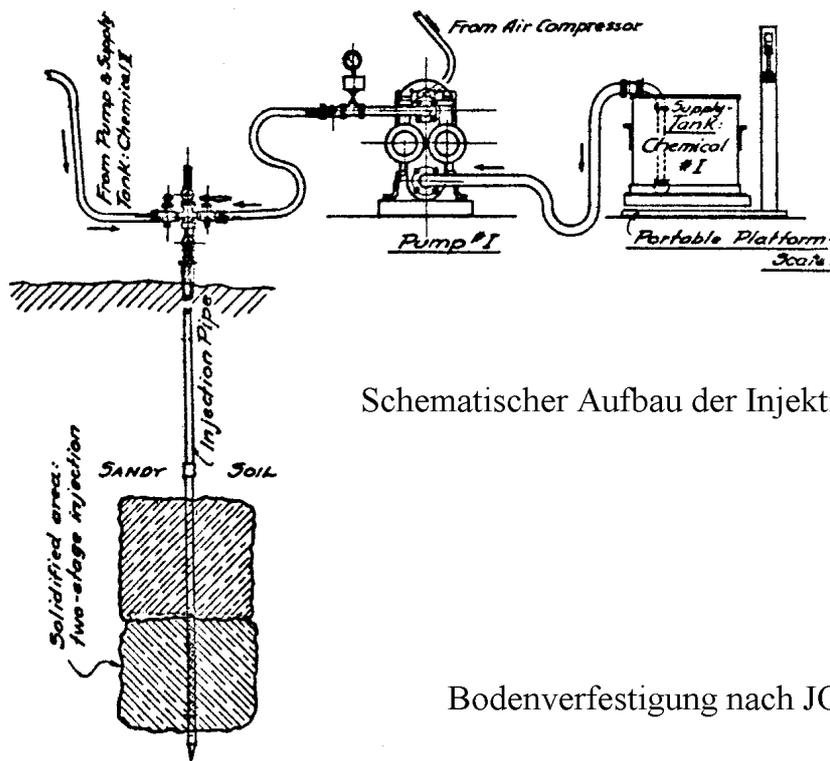
Die Arbeiten mit dem JOOSTEN - Verfahren erfolgen unter hohem Druck. Das Verfahren eignet sich zur schnellen Verfestigung durch Injektionen in grobkörnigen Böden und bedingt für feinkörnige Böden.

Die Verpressarbeiten können als Zweikomponenteninjektion durchgeführt werden. Zuerst wird eine Chemikalie injiziert, anschließend die zweite, wonach beide Chemikalien aushärten. Eine Abwandlung davon ist die Einkomponenteninjektion. Die Substanz härtet nach dem Verpressen langsam aus. Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung des JOOSTEN - Verfahrens sind ein hoher nutzbarer Porenraum sowie eine ausreichend hohe Durchlässigkeit des zu verfestigenden Bodens.

Die Anwendung in feinkörnigen tonigen Böden ist nicht möglich. Bei Injektionsverpressungen entstehen in bindigen Böden nur teilweise und unregelmäßig verfestigte Bodenbereiche.

Eine gleichmäßige Verfestigung des feinkörnigen Untergrundes kann bei gering durchlässigen Gesteinen nicht erreicht werden. Jedoch kann durch Verpressen von JOOSTEN - Lösungen (Einkomponentenverfahren oder Zweikomponentenverfahren), in gleicher Weise wie bei Zementinjektionen eine Stützfunktion im aufgerissenen Bodengefüge herbeigeführt werden. Der Setzung von Bauwerken kann so entgegengewirkt werden. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Laboruntersuchungen wurde auch überprüft, ob ein Durchmischen des Bodenmaterials mit den JOOSTEN - Chemikalien ähnliche Werte ergab, wie die Behandlung mit Wasserglas  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  und Soda  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (vgl. Kapitel 4.4.3).

Bei der aktuellen Injektionstechnik werden für Abdichtungen (KIRSCH, 1982 und 1994; TAUSCH 1994; Karstedt, 1996) elastische und erosionsbeständige Weichgele (z. B. Monosol), und für Verfestigungen sehr feste Hartgele (Kunstharze, wie z. B. Polyurethanharze oder Organomineralharze) verwendet (STEIN und GERDES, 1988).



**Abb. 1** Darstellung des JOOSTEN-Verfahrens (RIEDEL, 1952).

## B. Wasserglas - Verfahren

Untersuchungen zur Bodenverfestigung mit Wasserglas wurden von amerikanischen Wehrgeophysikern durchgeführt (HURLEY & THORNBURN, 1969). Wasserglas härtet an der Luft aus und bildet eine glasige Masse. Bei Sanden ließen sich teilweise positive Ergebnisse nach Aushärten des Wasserglases nachweisen. Bedingt durch das geringe Eindringvermögen des Wasserglases, konnte jedoch nur der obere Bereich des Sandkörpers verfestigt werden. Eine Passierbarkeit der künstlich verfestigten Sandkörper durch Fahrzeuge war nur eingeschränkt möglich, da diese ab einer bestimmten Gewichtsklasse, Jeep oder 2 t LKW, durch die verfestigte Kruste brachen. Bei feinkörnigen Böden konnte keine Verfestigung erreicht werden.

Bei dem für die vorliegende Versuche verwendeten Wasserglas handelt es sich um Natronwasserglas der folgenden Zusammensetzung (nach Angaben der Firma MERCK):

Na <sub>2</sub> O	7,5-8,5 %
SiO <sub>2</sub>	25,5-28,5 %

An der Luft härtet die Substanz zu einer glasartigen Masse aus. Wie schon angesprochen, beschäftigten sich vor allem amerikanische Wehrgeophysiker mit den Reaktionen von Wasserglas in verschiedenen Böden, wobei bei tonhaltigen Böden keine wesentliche Verfestigung zu erreichen war (HURLEY & THORNBURN, 1969).

### C. Verflüssigen von Böden

Durch Zusätze von Phosphaten, Soda und Polyanionen kann das Fließverhalten von Tonen entscheidend verändert werden. (JASMUND & LAGALY, 1993).

Die Art des Fließens, Fließgrenze, Thixotropie, Antithixotropie, thixotropes Grenzvolumen, Temperaturabhängigkeit und Viskosität werden bei einem gegebenen Tonmineral bestimmt durch:

- den Massenanteil des Tonminerals in der Dispersion,
- Art und Mengenverhältnis der Gegenionen, vor allem durch das Verhältnis Natrium- und Calciumionen,
- den pH-Wert,
- die Salzkonzentration und
- die vorhandenen Beimengungen.

Verflüssigung durch Soda:

Natriumkarbonat ist ein in der keramischen Gießerei schon lange bekanntes und genutztes Thixotropiermittel, um Suspensionen bei niedrigstem Wassergehalt fließfähiger zu machen. Durch Ionenaustausch und eine Umladung der Kontaktstellen bricht die Kartenhausstruktur der Phyllosilikate zusammen. Die Stützstruktur wird zerstört und die Suspension niedrigviskoser. Der Ionenaustausch geschieht durch den Ersatz des 2-wertigem Calcium durch 1-wertiges Natrium.

Die Zugabe von Natriumkarbonat bei Kaolinen (Sodaaktivierung) bewirkt den Austausch von  $\text{Ca}^{++}$  durch  $\text{Na}^{+}$ . Damit werden die physikalischen Eigenschaften dahingehend verändert, daß bei gleichem Wassergehalt die Fließfähigkeit verbessert wird (JASMUND & LAGALY, 1993). Die Sodaaktivierung wird z. B. in folgenden technischen Bereichen (FAHN & BUCKEL, 1968) verwendet:

- Gießereitechnik (Formsandbindemittel)
- Bohrspülflüssigkeiten
- Bauindustrie
- Keramikindustrie

#### D. Bodenverfestigung mit Kalk

Boden kann durch Zusatz von Feinkalk ( $\text{CaO}$ ), Kalkhydrat ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) oder hochhydraulischem Kalk ( $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CaOFe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CaOSiO}_2$ ) verfestigt werden.

Die chemische Wirkung des Kalkes im Boden:

*Kalke in Form von Branntkalk, Kalkhydrat oder hydraulischem Kalk rufen in Böden Sofort- und Langzeitreaktionen hervor. In Abhängigkeit von der Bodenart wird je nach Anwendungszweck durch die Wahl der Kalkart und Kalkmenge die Sofortreaktion als Bodenverbesserung oder die Langzeitreaktion als Bodenverfestigung in den Vordergrund treten. Sofortreaktionen nach Einbringen des Kalkes in den Boden sind Ionenaustausch am Tonmineral und das Löschen des Branntkalkes. Dies führt zur Verringerung von Wassergehalt und Plastizität und zur Verbesserung der Einbaufähigkeit. Die Langzeitreaktionen betreffen die Erhärtung des Boden-Kalk-Gemisches in Form der hydraulischen Erhärtung (Puzzolan-Reaktion) und der Karbonatisierung (Dachroth, 1990).*

Zu beachten sind die technischen Prüfvorschriften *Eignungsprüfungen bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat - 1981* und *Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigungen mit hochhydraulischem Kalk - 1977*. Die Bestimmung der benötigten Bindemittelmenge erfolgt nach ZTVV-StB 81.

Eine Bodenverfestigung mit Kalk ist nur über Langzeitreaktionen möglich.

## E. Bodenverfestigung mit Zement

*Zement wird sowohl zur Verfestigung eines Planums als auch für den Unterbau verwendet. Beim Erhärten des Boden-Zement-Gemisches entsteht eine Art Magerbeton mit halbstarren Eigenschaften und Druckfestigkeiten zwischen 2 und 7,5, maximal 12,5 N/mm<sup>2</sup>. Der derart behandelte Boden ist im Vergleich zum Ausgangsmaterial stabil gegen Verformung bei Einwirkung von Wasser, Frost und Verkehrsbelastung.*

*Außerdem wird Zement auch zur Verbesserung der Einbaufähigkeit von Böden benutzt.*

*Verwendet werden Portlandzement oder ein speziell für die Verfestigung von Böden entwickelter hydrophober Zement mit der Handelsbezeichnung "Pectracrete".*

*Die Verfestigung der Boden-Zement-Mischung wird durch den Vorgang der Hydratation (Abbinden) des Zementes eingeleitet. Anschließend erfolgt die Erhärtung.*

*Zement eignet sich nicht für stark plastische Schluff- und Tonböden. Feinkörnige Böden lassen sich nur schwer zerkleinern und mit Zement vermischen (Dachroth, 1990).*

*Die Eignungsprüfung erfolgt nach der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Strassenbau TP BF-StB 1986, Teil B 11.1, Eignungsprüfung bei Bodenverfestigung mit Zement.*

*Die Methode der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Zement ist auf Grund der schlechten Mischbarkeit mit ausgeprägt plastischen Schluff- und Tonböden ungeeignet.*

## F. Bodenverfestigung mit bituminösen Bindemitteln

*Durch das Einmischen von bituminösen Bindemitteln in einen Boden und durch das abschließende Verdichten wird das Korngerüst bleibend verkittet. Das bituminöse Bindemittel gibt dem Boden eine zusätzliche und bleibende Kohäsion, die auch bei Wasserzutritt wirksam wird. Es entsteht eine flexible frost- und wasserbeständige sowie lastverteilende Schicht. Die Verfestigung eignet sich für fast alle Böden (Dachroth, 1990).*

Über die Brauchbarkeit des bituminösen Bindemittels zur Verfestigung eines Bodens entscheidet die Eignungsprüfung. Sie gibt Aufschluß über die zu verwendende Bitumenart. Zu beachten ist das vorläufige *Merkblatt für Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit bituminösen Bindemitteln-1972*.

Für Böden mit einem Kornanteil von mehr als 37,5% < 0,063 mm und mehr als 12 % < 0,001 mm ist die Bodenverfestigung mit bituminösen Bindemitteln ungeeignet.

## G. Sonstige Verfahren zur chemischen Bodenverfestigung

Zur Bodenverfestigung wurden weitere Mittel wie Öle, Sulfitablauge, Kalziumacrylat, Melassen, Phosphorsäuren, Epoxydharze, bituminöse Mittel eingesetzt. Bei diesen Produkten handelt es sich teilweise um Abfallprodukte der chemischen Industrie. Produktbezeichnungen sind z. B. Reynold' s Road Packer, Soil Consolid 444. HÜBNER & SUSS (1975) prüften einige dieser Zuschlagstoffe. Die Ergebnisse waren unbefriedigend.

Abschließend zu diesem Kapitel kann gefolgert werden, daß eine Bodenverfestigung bindiger Böden mit den bekannten Verfahren nur über Langzeitreaktionen oder gar nicht möglich ist. Die Untersuchung des Hyratonverfahrens könnte also eine alternative Möglichkeit bieten, bindige Böden schnell und effektiv zu verfestigen.

## **2.4 Besonderheiten des Hydratonverfahrens**

Das Hydratonverfahren weist die Besonderheit auf, bindige Böden auch bei hohen Wassergehalten im Bereich der Fließgrenze schnell und effektiv zu verfestigen. Beim Hydratonverfahren findet kein Verstopfen der Poren und kein Verkleben der Körner statt. Es finden Reaktionen zwischen den Tonmineralen und den zugemischten Chemikalien statt, die ein einheitliches festes Boden-Chemikalien-Gemisch ergeben. Durch die schnelle Reaktion bestimmter Tone mit Wasserglas-Soda-Gemischen kann innerhalb kürzester Zeit eine hohe Stabilität der behandelten bindigen Böden erreicht werden. Dadurch besteht die Möglichkeit ohne Materialaustausch in situ Reparaturen bei durch zu hohem Wassergehalt aufgetretenen Schäden vorzunehmen.

## **3. Untersuchungsmethodik und Ausführung**

Der experimentelle Teil dieser Arbeit ist darauf ausgerichtet:

1. Die zu testenden Bodenproben zu charakterisieren.
2. Die Wasserglas-Soda Zumischungen unter variierenden Bedingungen vorzunehmen und die Ergebnisse der Verfestigungen festzustellen.

Für die folgenden Untersuchungen werden für jede Probe 2000 Gramm Trockenmasse bearbeitet. Die Versuche werden entsprechend den vorgegebenen Normen durchgeführt.

### 3.1 Methoden zur Probenbeschreibung

Die Bodenklassifikation (Gruppeneinteilung der Böden für bautechnische Zwecke) wird nach DIN 18196 vorgenommen.

*Mit dieser Norm werden die Böden in Gruppen mit annähernd gleichem stofflichem Aufbau und ähnlichen bodenphysikalischen Eigenschaften wie*

- *Scherfestigkeit,*
- *Verdichtungsfähigkeit,*
- *Zusammendrückbarkeit,*
- *Durchlässigkeit,*
- *Witterungs- und Erosionsempfindlichkeit,*
- *Frostempfindlichkeit*

*im Hinblick auf ihre bautechnische Eignung z. B. als:*

- *Baugrund für Gründungen,*
- *Baustoff für Erd- und Baustraßen,*
- *Baustoff für Straßen- und Bahndämme,*
- *Baustoff für Erdstaudämme (Dichtung, Stützkörper), Baustoff für Dränagen*  
*zusammengefasst.*

Klassifikationsmerkmale nach DIN 18196 sind:

- a) Korngrößenbereiche
- b) Korngrößenverteilung
- c) plastische Eigenschaften
- d) organische Bestandteile
- e) Entstehung

*Zum Klassifizieren wird die Bodenprobe mit Kurzzeichen nach DIN 18196 gekennzeichnet. Dabei gibt der erste Kennbuchstabe den Hauptbestandteil und der zweite eine bestimmte kennzeichnende bodenphysikalische Eigenschaft oder den Nebenbestandteil an.*

Die untersuchten, hier relevanten Böden werden durch die Bestimmung von

- Korngrößenverteilung,

- plastische Eigenschaften (Bestimmung der Konsistenzgrenzen)

den Bodengruppen UL (leicht plastischer Schluff), TL (leicht plastischer Ton), TM (mittelplastischer Ton), TA (ausgeprägt plastischer Ton) und OT (Ton mit organischen Beimengungen) nach DIN 18196 zugeordnet.

### **3.1.1 Wassergehalt**

Definition:

*Der Wassergehalt  $w$  einer Bodenprobe ist das Verhältnis der Masse des im Boden vorhandenen Wassers  $m_W$ , das bei einer Temperatur von  $105^\circ\text{C}$  verdampft, zur Masse  $m_d$  der trockenen Probe.*

Der Wassergehalt wird nach DIN 18121, T 1 durch Ofentrocknung bei  $105^\circ\text{C}$  oder im Schnellverfahren im Mikrowellenherd ermittelt. Die Verweilzeit der Probe im Mikrowellenherd wird durch vergleichende Untersuchungen mit dem Trockenschrank bestimmt. Proben, die einer chemischen Behandlung mit Wasserglas-Soda-Gemischen unterzogen werden sollen, werden nicht thermisch behandelt. Es soll verhindert werden, daß Zwischenschichtwasser aus den Tonmineralen ausgetrieben wird.

Bestimmung des Wassergehaltes:

$$w \text{ [\%]} = m_W / m_t * 100 ; m_t = \text{Trockenmasse, } m_W = \text{Wassermasse}$$

Alle bei den folgenden Untersuchungen angegebenen Wassergehalte werden nach dieser Formel bestimmt. Dadurch ist es möglich, daß die Wassergehalte z. B. ausgeprägt plastischer Tone 100 % (Gewichts-%) übersteigen.

Beispiel:

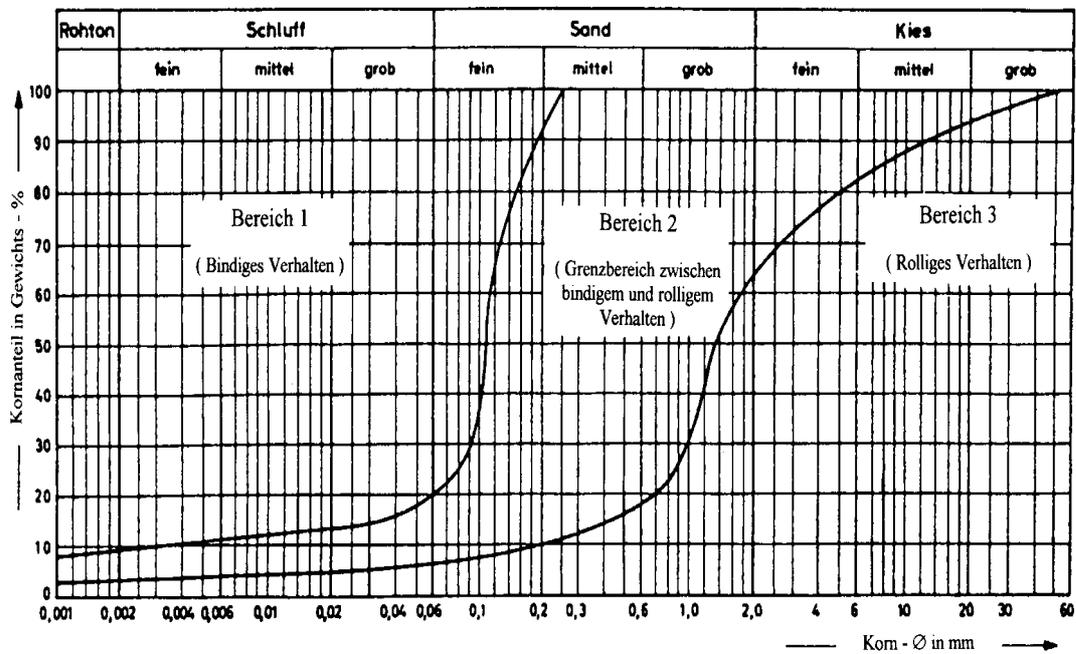
Eine Bodenprobe besitzt eine Trockenmasse von 1,0 g und eine Wassermasse von 1,1 g, dann wäre das Ergebnis  $1,1 / 1 = 1,1 * 100 = 110 \%$  Wassergehalt.

### 3.1.2 Kornverteilung

Die Kornverteilung wird durch kombinierte Siebung und Schlämmung nach DIN 18123 bestimmt. Je nach Zusammensetzung der Bodenprobe wird eine Siebung oder Schlämmung oder eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind als Übersichtstabelle (Tabelle 3, Kapitel 4) dargestellt.

Bei der Schlämmanalyse wird mit Natriumpyrophosphat (tetra-Natriumdiphosphat-10-hydrat;  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 * 10 \text{ H}_2\text{O}$ ) als Dispersionsmittel gearbeitet.

Allgemein wird die Korngrößenverteilung in Form einer Körnungslinie (Summenkurve) in einfach logarithmischem Maßstab dargestellt (Abb. 2).



**Abb. 2** Bereichsgrenzen für rolliges bzw. bindiges Verhalten nach LEUSSINK et al., 1964 (aus PRINZ, 1987)

### 3.1.3 Konsistenzgrenzen (Zustandsgrenzen)

*Die Zustandsgrenzen sind ein Maß für die Bildsamkeit des Bodens (Plastizität) und für seine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes. Sie werden deshalb zur Einteilung der bindigen Böden in Gruppen verwendet (DIN 18196). Sie geben in Verbindung mit dem jeweiligen Wassergehalt einen Anhalt für die Zustandsform des bindigen Bodens (Konsistenz) und damit für dessen Festigkeit. Die Plastizität ist in Verbindung mit dem Feinstkorn ein Anhalt für die Aktivität der Tonmineralien (DIN 18122-1).*

Die Zustandsform eines bindigen Lockergesteins wird in der Geotechnik als Konsistenz bezeichnet.

Definition nach DIN 18122-1:

*Vom Wassergehalt abhängiger Bereich der Verformbarkeit eines gestörten bindigen Bodens. Mit abnehmendem Wassergehalt geht bindiger Boden von der flüssigen in die bildsame (plastische), dann in die halbfeste und schließlich in die feste (harte) Zustandsform über. Die bildsame Zustandsform wird weiter unterteilt in die Zustandsformen breiig, weich und steif.*

Die Plastizität der Tone hängt weitgehend von der Anziehung und Abstoßung der Tonmineralteilchen ab. Sie ändert sich mit den austauschbaren Kationen und der Elektrolytkonzentration der Porenlösung.

Dabei ist zu unterscheiden zwischen intrakristallin nicht quellfähigen Tonmineralen, wie Kaolinit und Illit, und intrakristallin quellfähigen, vor allem Montmorillonit (JASMUND & LAGALY, 1993).

Die Konsistenzgrenzen werden nach DIN 18122-1 bestimmt. Die Probe wird über einen Zeitraum von 12 h in destilliertem Wasser eingeweicht und anschließend bis zur vollständigen Homogenisierung gemischt. Zur Bestimmung der Fließgrenze wird das Fließgrenzengerät nach CASAGRANDE verwendet.

Das Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE (Abb. 3; nach MUHS, 1980) ermöglicht die Klassifikation bindiger Böden, abhängig von den plastischen Eigenschaften und dem Einfluß organischer Anteile in verschiedene Bodengruppen.

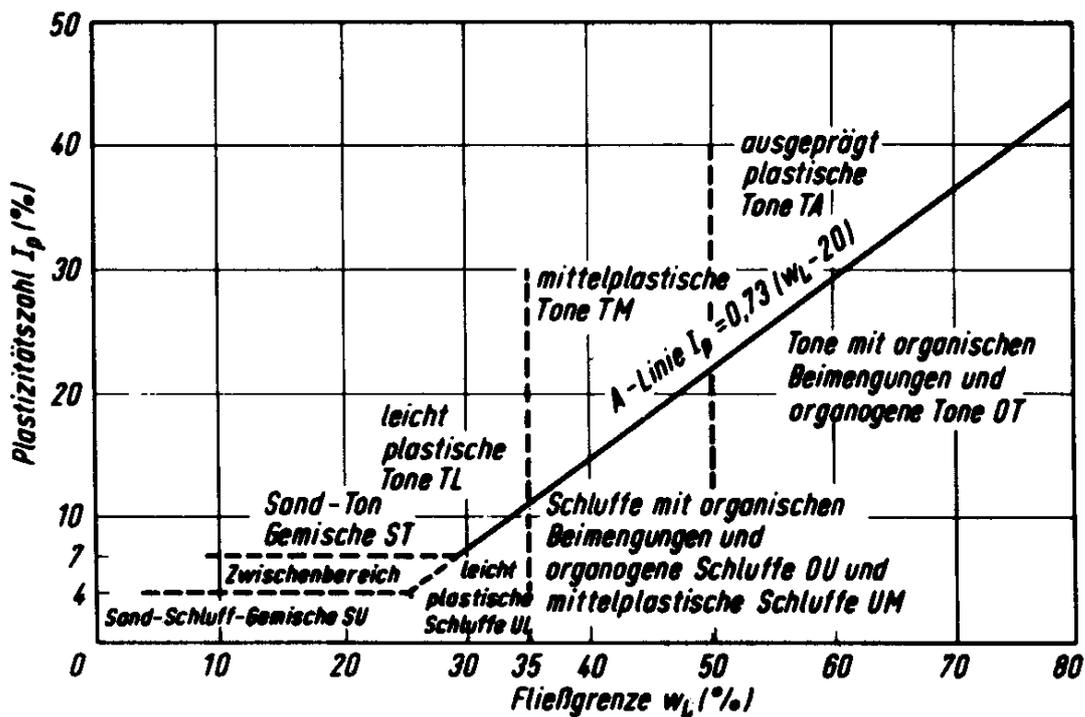


Abb. 3 Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE (nach MUHS, 1980)

Bestimmt werden die Zustandsgrenzen Fließgrenze, Ausrollgrenze und Plastizitätszahl. Die Maßeinheit ist %. Die Bestimmung der Konsistenzzahl ist für den Eignungstest bezüglich der Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen nicht erforderlich.

**Fließgrenze  $w_L$ :**

Der Wassergehalt am Übergang von der flüssigen zur bildsamen Zustandsform.

Dies entspricht einem Wassergehalt von 25 Schlägen im Fließgrenzenmessgerät (DIN 18122, T1).

**Ausrollgrenze  $w_P$ :**

Der Wassergehalt am Übergang von der bildsamen zur halbfesten Zustandsform.

Die Ausrollgrenze entspricht einem Wassergehalt, bei dem 3 bis 4 mm dicke Bodenproben beim Ausrollen auf einer wasseraufsaugenden, nicht fasernden Unterlage zu zerbröckeln beginnen.

**Plastizitätszahl oder Bildsamkeitszahl  $I_P = w_L - w_P$ :**

Die Differenz zwischen Fließgrenze und Ausrollgrenze.

Die Plastizitätszahl ist ein Maß für die Plastizität bindiger Böden und dient nach DIN 18196 und dem Plastizitätsdiagramm von CASAGRANDE zur Unterscheidung, ob nach bodenmechanischer Definition ein Schluff oder Ton vorliegt.

**Konsistenzzahl; Zustandszahl  $I_C$ :**

Kennwert, der aus dem Wassergehalt an der Fließgrenze  $w_L$  und der Ausrollgrenze  $w_P$  mit Hilfe des natürlichen Wassergehaltes  $w$  des Bodens (der Wassergehalt den der Boden bei feldfrischer Entnahme besitzt) berechnet wird. Für die Bestimmung der Konsistenzzahl wird der natürliche Wassergehalt der feldfrischen Bodenprobe benötigt. Bei einigen untersuchten Bodenproben war der natürliche Wassergehalt nicht mehr gegeben. Daher wird die Konsistenzzahl nicht bestimmt.

Die Bestimmung der Konsistenzzahl hat für die folgenden Untersuchungen keine Bedeutung, da die Konsistenz der feldfrischen Bodenprobe für die Untersuchungen unwichtig war.

Eine Konsistenzzahl von

0 - 0,25 (für 0 =  $w = w_L$  = breiig)

0,25 - 0,50 = sehr weich

0,50 - 0,75 = weich

0,75 - 1,00 = (für 1 ist  $w = w_p$  = steif)

1,00 - 1,25 = halbfest und

> 1,25 = fest (PRINZ, 1997).

#### **Aktivitätszahl:**

Die Aktivitätszahl  $I_A$  von SKEMPTON (1953) gibt einen Anhalt über die Art und die Plastizität der Tonminerale. **Die Aktivitätszahl gilt als eine wichtige Kenngröße für die Existenz von quellfähigen Tonmineralen. Die Bestimmung der Aktivitätszahl soll Auskunft über den Einfluß von quellfähigen Tonmineralen auf die Festigkeit der mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelten Proben geben.** Der Zusammenhang zwischen der Aktivitätszahl und der Scherfestigkeit kann ein Merkmal für die Materialeignungsprüfung von Böden sein.

Die Auswirkungen der Aktivitätszahl auf die Plastizitätszahl und die Festigkeit chemisch behandelter Proben werden in Kapitel 4 und 5 erläutert.

Sie ergibt sich nach Lang & Huder aus der Plastizitätszahl  $I_p$  durch Division mit dem prozentualen Anteil der Kornfraktion  $< 0,002$  mm, bezogen auf ein Maximalkorn von 0,5 mm.

$I_A = I_p/q^*$  ,  $q^*$  = prozentualer Anteil der Fraktion  $< 0,002$  mm, bezogen auf ein Maximalkorn von 0,5 mm (LANG & HUDER, 1994).

Die Ergebnisse sind folgendermaßen zu interpretieren :

$I_A < 0,75$  inaktiv

$0,75 < I_A < 1,25$  normal aktiv

$I_A > 1,25$  aktiv

**Tabelle 1:** Typische Aktivitätszahlen mono - mineralischer Proben.

Mineral	Aktivitätszahl
Quarz	ca. 0
Kaolinit	ca. 0,33
Illit	ca. 0,90
Ca-Montmorillonit	1,5
Na-Montmorillonit	7,5

Bestimmung nach DIN 18122, Teil 1:

Die Aktivitätszahl ergibt sich aus der Plastizitätszahl dividiert durch die Masse der Tonfraktion  $m_T$  ( $< 0,002$  mm) bezogen auf die Trockenmasse  $m_D$  der Körnung  $\leq 0,4$  mm:

$$I_A = I_P : m_T / m_D$$

Die Überschreitung des Wertes von 1,25 soll ein Vorhandensein von quellfähigen Tonmineralen anzeigen (v. SOOS 1980: 81; MÜLLER 1987). Für Aktivitätszahlen  $> 2,0$  wird von VÖLTZ et al. (aus PRINZ, 1997) der Bereich "sehr aktiv" eingeführt.

### 3.1.4 Mineralzusammensetzung (aus Röntgenbeugung)

Um die Abhängigkeit der Bodenverfestigung von der Art und Mischung der Tonminerale zu untersuchen, werden alle Proben mit einem Röntgen-diffraktometer untersucht. Verwendet wird ein SIEMENS-Gerät vom Typ D 500 MP, das mit einem Mikroprozessor vom Typ DACO MP gekoppelt ist. Es wird das Software-Paket DIFFRAC AT V 3.0 verwendet. Die erhaltenen Spektren lassen sich qualitativ und halbquantitativ auswerten (CARROL, 1970).

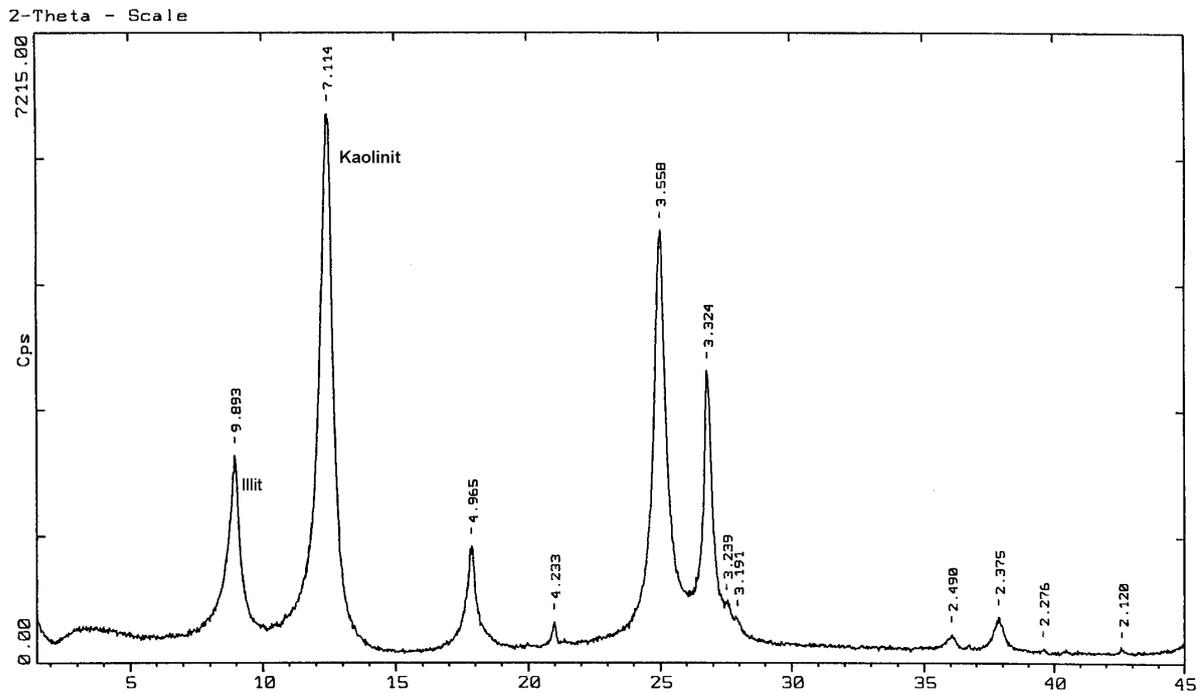
Das Höhenverhältnis bestimmter Spektrallinien zueinander kann zum Abschätzen für den Mengenanteil des jeweiligen Minerals verwendet werden.

Aus dem Vergleich von Eignungstest und Mineralzusammensetzung nach den röntgenographischen Beugungsdiagrammen können die Verfestigungseigenschaften bestimmten Tonmineralgruppen zugeordnet werden.

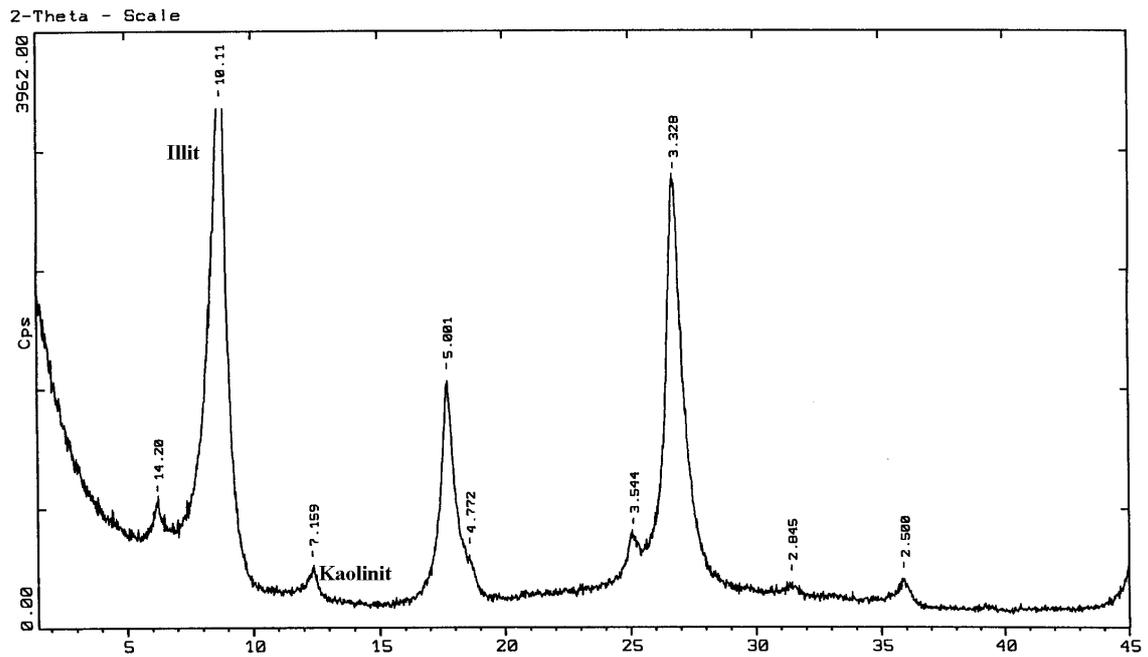
Bei den Haupttonmineralen der untersuchten Proben handelt es sich um Illit und Kaolinit. Um die Auswirkungen dieser Tonminerale auf die Verfestigung mit chemischen Zuschlagstoffen zu untersuchen wird folgende Methode angewandt:

Die Länge des [001] - Basisreflexes von Illit wird gemessen und zur Länge des [001] - Basisreflexes von Kaolinit ins Verhältnis gesetzt. Beispiele sind die Abbildungen 4 und 5. Die ermittelten Werte werden mit den erzielbaren Festigkeiten der mit chemischen Zuschlagstoffen behandelten Proben verglichen. Ein Wert  $> 1$  bedeutet, daß der Illit [001] - Basisreflex höher als der Kaolinit [001] - Basisreflex ist. Erschwert wird diese Möglichkeit der Auswertung, durch Reflexüberlagerungen. Das heißt Reflexe von unterschiedlichen Tonmineralen können sich überlagern.

Daher handelt es sich bei dieser Methode nicht um ein absolutes Kriterium zum Beurteilen sondern um einen Anhaltspunkt für die Anwendung chemischer Zuschlagstoffe.



**Abb. 4** Beispiel eines Röntgendiagramms eines ausgeprägt plastischen Tones (Probe 8; roter Ton aus Eisenberg). Die [001] - Basisreflexe der Tonminerale Illit und Kaolinit sind namentlich gekennzeichnet, da sie bei der Behandlung mit Wasserglas-Soda-Gemischen wichtig sind. Das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis ist  $< 1$ .



**Abb. 5** Beispiel eines Röntgendiagramm eines mittel plastischen Tones (Probe 1; roter Ton aus Haiterbach). Die [001] - Basisreflexe der Tonminerale Illit und Kaolinit sind namentlich gekennzeichnet, da sie bei der Behandlung mit Wasserglas-Soda-Gemischen wichtig sind. Im Vergleich mit Abb. 4 ist der [001] - Basisreflex von Illit höher als der [001] - Basisreflex von Kaolinit. Das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis ist > 1.

## 3.2 Methoden zur Kontrolle der Bodenfestigkeit

Im folgenden Kapitel werden zwei Verfahren vorgestellt, um die Bodenfestigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt und dem prozentualen Chemikalgemischanteil zu messen.

Zur Kontrolle der Bodenfestigkeit wird die Scherfestigkeit gemessen.

Definition von Scherfestigkeit:

Die Scherfestigkeit eines Bodens oder Gesteins ist überschritten, wenn entlang einer oder mehrerer Flächen Verschiebungen stattfinden, die keine weitere Steigerung der Scherkräfte erfordern (PRINZ, 1997). Nach DIN 18137 ist die Scherfestigkeit in einer Scherfuge die Schubspannung, die im Grenzzustand auftritt

Die Scherfestigkeit kann bei verschiedenen Zuständen des zu prüfenden Bodens gemessen werden.

A. Im undränierten (nicht entwässertem) Zustand, wobei durch den Porenwasserdruck (Druck des freien Porenwassers) zusätzliche Kräfte entstehen, die einer Scherung entgegenwirken.

B. Im dränierten (entwässertem) Zustand, wobei Porenwasser ungehindert abströmen kann.

### 3.2.1 Kegelwiderstand als Vergleichswert zur undrÄnirten Scherfestigkeit

Definition:

Der "Kegelwiderstand" eines Bodens ist die Kraft die ben6tigt wird, einen definierten Kegel in den Boden einzudrücken. Er wird durch die Gewichtskraft des Kegels und dessen Eindringen gemessen. Der Kegel dringt entweder frei, d. h. mit seinem Eigengewicht, in die Probe ein ("Fallkegel") oder wird durch Zusatzgewichte eingedrückt ("Druckkegel" aus SCHULTZE & MUHS, 1967).

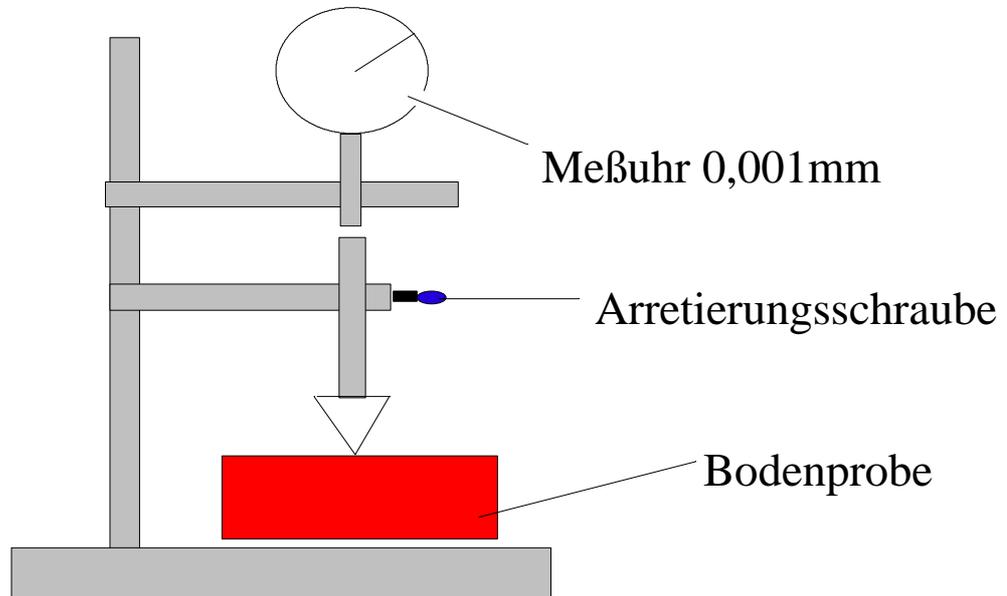
Bei den folgenden Versuchen wird der "Fallkegel" verwendet. Dieses Verfahren nach HANSBO 1957 bietet die M6glichkeit, über die Eindringtiefe  $s$  [mm] eines Kegels mit dem Gewicht  $P$  [g] in die Bodenprobe, den Scherwiderstand im nicht entwässerten (undrÄnirten) Zustand zu bestimmen:

$$\text{Scherfestigkeit} = K * P/s^2 * 10 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Hierin ist  $K$  ein dimensionsloser Beiwert, der vom 6ffnungswinkel des Kegels und der "St6rung" (ungest6rter oder gest6rter Zustand) des Bodens abhÄngt. F6r ungest6rte Proben ergibt sich  $K = 0,20$  bis  $0,25$  f6r den  $60^\circ$  -Kegel und  $K = 0,8$  bis  $1,0$  f6r den  $30^\circ$  -Kegel; f6r gest6rte Proben ergibt sich beim  $60^\circ$  -Kegel  $K = 0,30$ .

Die Ergebnisse der Kegelfallversuche sind gut mit den Ergebnissen von Fl6gelsondenversuchen und Zylinderdruckversuchen vergleichbar (HANSBO, 1957).

# Vorrichtung zum Ermitteln des Kegelwiderstandes



**Abb. 6** Darstellung der Versuchsanordnung beim Kegelfallversuch; auf den Kegel können Zusatzgewichte aufgelegt werden, um eine ausreichende Eindringtiefe zu bewirken.

Versuchsbeschreibung:

Die Versuche werden durchgeführt, indem der Kegel mit der Spitze so ausgerichtet wird, daß er die Probenoberflächen berührt, ohne einzudringen. Die Meßuhr wird auf 0 eingestellt. Anschließend wird der federbelastete Meßdorn der Uhr festgehalten, damit er den Kegel nicht beeinflussen kann. Die Arretierungsschraube wird kurz geöffnet und sofort wieder geschlossen. Nun wird anhand der Meßuhr die Eindringung des Kegels bestimmt. Um den Einfluß von Inhomogenitäten zu minimieren, werden die Werte von jeweils 6 Einzelversuchen gemittelt. Dabei wird stets ein neuer Teil der Probenfläche geprüft. Die Eindringtiefe soll mindestens 4-8 mm betragen.

Anwendung:

Die schwedische Kegelprobe, auch "Kegelfallversuch" genannt, dient in erster Linie dazu, die Zustandsform (Festigkeit) von Tonschichten in ähnlicher Weise zu verfolgen, wie es mit der Konsistenzzahl geschieht. Außerdem erlaubt sie Schlüsse auf die Größe der Scherfestigkeit im nicht entwässerten Zustand. Durch den Kegelfallversuch können dränierte Rahmenscherversuche (siehe Kapitel 3.2.2) nicht ersetzt werden, da der Kegelfallversuch nur Auskunft über die Scherfestigkeit im nicht entwässerten (undrännierten) Zustand gibt.

### **3.2.2 Scherfestigkeit - dräniert**

Die Scherfestigkeit eines Bodens oder Gesteins ist überschritten, wenn entlang einer oder mehrerer Flächen Verschiebungen stattfinden, die keine weitere Steigerung der Scherkräfte erfordern. Der Scherwiderstand  $\tau$  entlang dieser Flächen setzt sich aus Reibung, ausgedrückt durch den Reibungswinkel  $\varphi$ , und der Kohäsion  $c$  zusammen. Er kann nach der Bruchbedingung von Coulomb als lineare Funktion der Normalspannung  $\sigma$  bzw.  $\sigma_f$  formuliert werden:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad [\text{kN/m}^2]$$

Der Reibungswinkel  $\varphi$  ist von der Normalspannung unabhängig. In bindigen Böden setzt sich die Scherfestigkeit aus dem Reibungswinkel  $\varphi$  und der von der Normalspannung abhängigen Kohäsion  $c$  zusammen. Diese ist auf die zwischen den Körnern wirkenden Haftkräfte zurückzuführen. Sie ist abhängig vom Anteil der Tonminerale, vom Wassergehalt, dem Sättigungsgrad mit Wasser und dem Belastungszustand (PRINZ, 1997).

Die Scherfestigkeit wird nach DIN 18137, Blatt 1 bestimmt. Verwendet wird ein Rahmenschergerät. Im Rahmenscherversuch wird die Probe in kreisförmigen Rahmen zwischen gezahnten Filtersteinen eingebaut. Nach Probeneinbau und einer kurzfristigen Pause, um Primärsetzung abklingen und Porenwasser abströmen zu lassen, wird die Probe in der Mitte abgeschert. Die Scherbewegung, mit einer Geschwindigkeit von 0,17 mm/min, wird durch einen Motor mit konstanter Drehzahl verursacht. Die Auflast auf die Teilproben wird kontinuierlich von 50 auf 200 kN/m<sup>2</sup> gesteigert. Die Spitzenwerte der Scherfestigkeit bei den einzelnen Laststufen werden zur Ermittlung des Reibungswinkels und der Kohäsion verwendet. Es werden nur Langsam-Versuche mit konstanter Schergeschwindigkeit (0,17 mm/min) durchgeführt.

Vergleich der undränierten Scherfestigkeit durch den Kegelfallversuch mit der dränierten Scherfestigkeit ermittelt im Rahmenschergerät:

Im Rahmenscherversuch DIN 18137, Blatt 1 wird die Bodenprobe bei verhinderter Seitenausdehnung unter einer definierten Normalspannung konsolidiert und durch weggesteuertes Ziehen einer der beiden Rahmenhälften abgeschert.

Im Rahmenscherversuch werden die wirksamen oder effektiven Scherparameter  $c'$  und  $\phi'$  des entwässerten (dränierten) Bodens ermittelt.

Die undränierte Scherfestigkeit entspricht dem scheinbaren Scherparameter  $c_u$  (Kohäsion) des nicht entwässerten (undränierten) Bodens. Die Kohäsion  $c_u$  dient zur Berechnung der Anfangsfestigkeit, besonders bei schnellen Belastungen (PRINZ, 1997). Die scheinbare Kohäsion  $c_u$  ist, da das Porenwasser nicht abströmen kann, höher als die der wirksamen Kohäsion  $c'$ .

## 4. Proben, Experimente, Ergebnisse

Die folgenden Kapitel geben Aufschluß welche Proben untersucht werden und nach welchen Gesichtspunkten sie ausgesucht werden.

### 4.1 Proben

Die Einteilung der Proben wird nach DIN 18196 -Klassifikation der Bodengruppen für bautechnische Zwecke- durchgeführt.

Nach KEIL läßt sich das Hydratonverfahren nur bei "aktivierbaren Tonen" (vgl. Kapitel 5.3.5) anwenden. Daher konnten bei der Probenauswahl nichtbindige Böden mangels Wechselwirkung zwischen Tonmineralien und den verwendeten Chemikalien ausgeschlossen werden.

Leitidee für die Auswahl der Böden ist die zukünftige Anwendung der chemischen Bodenverfestigung mittels Wasserglas-Soda-Gemischen für bautechnische Zwecke. Eine große Bandbreite untersuchten Materials, bezüglich mineralogischer Zusammensetzung und bodenmechanischer Kennwerte, soll Zusammenhänge zwischen der mineralogischen Zusammensetzung und der Materialeignung für die chemische Bodenverfestigung mittels Wasserglas-Soda-Gemischen nachweisbar machen.

Untersucht werden dreissig Böden:

Proben aus unterschiedlichen geologischen Schichten:

- Marschenboden
- Löß
- natürliche Tone
- Böden mit unterschiedlichem Sand- Schluff- Tonanteil

Technisch verwertete und zum Teil hierfür veredelte Stoffe:

- Deichbaumaterial
- Deponiebasisabdichtungsmaterial
- industriell hergestellter Quellton

Durch die Bestimmung der Kornverteilung nach DIN 18123 und der Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze nach DIN 18122 werden die untersuchten Proben (Tabelle 1) in Bodengruppen nach DIN 18196 eingeteilt:

TL = leicht plastischer Ton

TM = mittelplastischer Ton

TA = ausgeprägt plastischer Ton

UL = leicht plastischer Schluff

OT = Tone mit organischen Beimengungen

**Tabelle 2a:** Überblick über die untersuchten Proben. Angegeben werden Herkunftsort, Zeit der geologischen Gesteinsbildung, Farbe und Bodengruppe nach DIN 18196.

Nr.	Bodengruppe nach DIN 18196	Entstehungszeit	Farbe	Herkunftsort
1	TM	Tertiär	rot	Haiterbach
2	TA	Tertiär	grün-gelb	Malsch
3	TL	Keuper	grau	Hilsbach
4	UL	Quartär	gelb	Bruchsal
5	TA	künstlicher Ton	grau	Marx Bergbau GmbH
6	TM	Quartär	grau	Heddesheim
7	TA	Tertiär	gelb	Eisenberg
8	TA	Tertiär	rot	Eisenberg
9	TA	Tertiär	grau	Eisenberg

**Tabelle 2b:** Überblick über die untersuchten Proben. Angegeben werden Herkunftsort, Zeit der geologischen Gesteinsbildung, Farbe und Bodengruppe nach DIN 18196.

<b>Nr.</b>	<b>Bodengruppe nach DIN 18196</b>	<b>Entstehungszeit</b>	<b>Farbe</b>	<b>Ort</b>
10	OT	Tertiär	grün	Eisenberg
11	TA	Tertiär	grau	Offenbach
12	OT	Quartär	braun-gelb	Frankfurt
13	TL	Quartär	braun	Ladenburg
14	TM	Quartär	dunkelgrau	Lauenburg
15	TL	Quartär	rot-braun	Böblingen
16	TL	Quartär	gelb	Finnland
17	TM	Quartär	grau	Crildumersiel
18	TM	Quartär	grau-gelb	Varel
19	TL	Quartär	braun	Ladenburg
20	TM	Keuper	grau-gelb	Sinsheim
21	TM	Keuper	grau-gelb	Gemmingen-Eppingen
22	TM	Quartär	grau	Weinheim
23	TA	Quartär	hellgrau-gelb	Weinheim
24	OT	Quartär	braun-schwarz	Hooksiel
25	TM	Quartär	schwarz	Frankfurt
26	TA	Tertiär	hellgrau	Frankfurt
27	TL	Quartär	hellbraun	Ladenburg
28	TA	Tertiär	hellgrau-gelb	Frankfurt
29	TL	Tertiär	grau	Frankfurt
30	TL	Quartär	braun	Siersburg

Im Anhang findet eine ausführliche Beschreibung der Einzelproben statt. Dort werden folgende Daten aufgezeigt:

- Bodenherkunft und Entstehungszeit der untersuchten Böden
- die bodenmechanischen Kennwerte der unbehandelten Böden
- die Mineralzusammensetzung der untersuchten Böden aus der Röntgenbeugung
- die Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung der untersuchten Böden nach Behandlung mit Wasserglas-Soda-Gemischen
- die Ergebnisse der Verfestigung der untersuchten Böden mit Wasserglas-Soda-Gemischen

## **4.2 Experimente**

Bevor die Chemikalien den Bodenproben zugemischt werden, werden die Reaktionen zwischen Wasserglas und Soda sowie zwischen Wasserglas und Kalziumchlorid (JOOSTEN-Zusätze) untersucht:

Bei Mischung von Wasserglas und Natriumkarbonat entsteht ein weißer, flockiger Niederschlag in der Lösung, der Verfestigungsvorgang dauert ca. 3 Minuten. Eine Aushärtung findet nicht statt.

Mischt man Kalziumchlorid und Wasserglas, dann entsteht ein schnell aushärtendes kalzitisch/silikatisches Gel. Der Verfestigungsvorgang ist nach ca. 15 Sekunden abgeschlossen. Die entstandene Substanz ist spröde und glashart. Beim Einsatz der JOOSTEN - Zusätze in grobkörnigen Böden entsteht in deren Porenraum ein aushärtendes kalzitisches Gel, welches ein Stützskelett ausbildet und die Körner verklebt. In den untersuchten Bodenproben ist ein nutzbarer Porenraum für eine solche Art der Verfestigung nicht vorhanden.

Daher wird bei den Untersuchungen auf Bodenverfestigung eine mechanische Durchmischung mit Wasserglas und Kalziumchlorid durchgeführt.

Nachdem die Böden den entsprechenden Bodengruppen nach DIN 18196 zugeordnet werden, werden die Proben für die Verfestigung mit Chemikalien vorbereitet. Dazu werden die Proben mit Wasser bis zum Erreichen der Fließgrenze, dem Wassergehalt am Übergang von der flüssigen zur bildsamen Zustandsform, angereichert. Die Probe wird mit einem Spachtel bis zur vollständigen Homogenisierung (im Fließgrenzenmessgerät überprüft) durchgearbeitet.

Für die Untersuchung wird die Bodenprobe in zwei Teile aufgeteilt:

Teil A: Zur Bestimmung der Festigkeit der unbehandelten Proben beim Wassergehalt der Fließgrenze.

An dieser Probe wird mit dem Kegelfallgerät und eingeschränkt mit dem Rahmenschergerät (die meisten Proben sind an der Fließgrenze zu flüssig und daher nicht messbar) die Festigkeit des Probenmaterials überprüft. Beim Rahmenschergerät kann Bodenmaterial mit niedriger Viskosität unter Belastung in die Fugen der Versuchsanordnung eindringen und die Meßwerte verfälschen. Nach Versuchsdurchführung ist bei jeder Probe die Apparatur auf mögliche Vergrößerung der Scherfläche durch in die Fuge eingedrungenes Bodenmaterial zu untersuchen.

Teil B: Zur Bestimmung der Festigkeit der behandelten Proben.

Zu Teil B wird der Feststoff, z. B. Soda in Pulverform zugegeben und die Masse mit einem Spachtel homogenisiert. Anschließend wird Wasserglas beigemischt und die Masse wieder mit einem Spachtel homogenisiert. Die Zeit ab der Zumischung von Wasserglas wird mit einer Stoppuhr gemessen.

Nach ca. 2 Minuten Durchmischen wird die Probe in einen Behälter eingebracht, die Oberfläche glattgestrichen und nach 5 Minuten wird der erste Kegelfallversuch durchgeführt.

Untersuchen der Festigkeit der behandelten Proben:

#### 1. Kegelwiderstand:

Führt man den Kegelfallversuch in verschiedenen Zeitintervallen an den behandelten Proben durch, so ist es möglich, die Eindringtiefe als Maß der erreichten Verfestigung über die Zeit darzustellen (Abb. 16). Die Versuche werden im Zeitraum von 5, 15, 30, 60 Minuten sowie nach 24 Stunden durchgeführt. Zum Schutz vor Austrocknen wird die Probe abgedeckt. Bei einigen Proben verfestigt sich die Probe so schnell, daß das Kegelgewicht nicht mehr ausreichte, um ein genügend tiefes Eindringen zu gewährleisten. Deshalb wird mit verschiedenen schweren Kegelgewichten gearbeitet. Das Bestimmen der Aushärtungszeit ist vor allem für die Verarbeitbarkeit am Einsatzort wichtig. Bei einem Schadensfall durch Bodenfließen ist eine möglichst schnelle Verfestigung erwünscht.

#### 2. Scherfestigkeit - dräniert

Bei den behandelten Proben wird ein Zeitraum von 24 Stunden bis Versuchsbeginn eingehalten, um eine maximale Verfestigung zu gewährleisten. Zusätzlich wird untersucht, ob die behandelten Proben ungestört eingebaut wesentlich höhere Werte der Scherfestigkeit ergeben. Der Unterschied ist minimal ( $< 10 \text{ kN/m}^2$ ). Es ist mit Abweichungen von max.  $10 \text{ kN/m}^2$  bei der Scherspannung und 1 - 2 Grad beim Reibungswinkel zu rechnen.

Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Festigkeit der behandelten Proben:

Ein wesentlicher Aspekt bei der Verfestigung ist der Wassergehalt des Bodens. Als markanter Parameter gilt die Fließgrenze.

Bei dem Wassergehalt der Fließgrenze werden alle Proben verfestigt. Parallel wird der Wassergehalt bei einzelnen Proben sowohl erhöht als auch erniedrigt, um dessen Auswirkungen auf die Verfestigung zu untersuchen.

Niedrigere Wassergehalte führen zu höheren Festigkeiten. Ausgeprägt plastische Tone, die bei der Verfestigung durch chemische Zuschlagstoffe ungenügende Festigkeiten liefern, können durch Wasserentzug in ihrer Festigkeit stark verbessert werden. Wie weit der Wassergehalt abgesenkt werden muß, ist abhängig vom Material und der geforderten Höhe der Festigkeit. Ein alleiniges Verringern des Wassergehaltes ohne Zusatz von chemischen Zuschlagstoffen führt nur zu einer unbedeutenden Verbesserung der Festigkeit.

### **4.3 Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen**

#### Kornverteilung

Auf Grund besserer Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse der 30 untersuchten Böden in einer Tabelle (Tabelle 3) dargestellt. Die Körnungslinien sind im Anhang bei der Beschreibung der einzelnen Bodenproben zu finden.

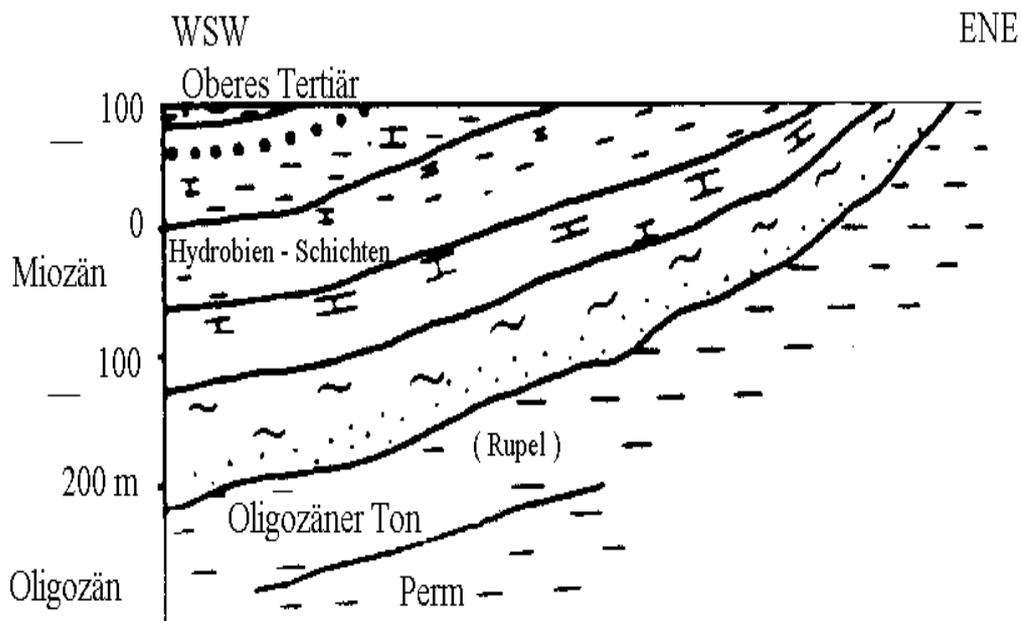
**Tabelle 3:** Ergebnisse der Kornverteilung aller untersuchter Böden

<b>Probe</b>	<b>Ton [%]</b>	<b>Schluff [%]</b>	<b>Sand [%]</b>	<b>Kies [%]</b>
1	47	46	7	0
2	82	14	4	0
3	22	38	40	6
4	5	85	10	0
5	82	16	2	0
6	30	63	7	0
7	68	24	7	0
8	82	11	7	0
9	84	7	9	0
10	74	21	5	0
11	43	57	0	0
12	22	67	11	0
13	12	43	44	0
14	20	66	14	0
15	36	36	23	5
16	19	72	9	0
17	11	56	30	3
18	12	58	28	2
19	2	61	39	0
20	29	61	18	2
21	33	44	20	3
22	27	68	5	0
23	45	51	4	0
24	54	42	4	0
25	12	33	52	3
26	26	58	16	0
27	4	66	30	0
28	40	40	20	0
29	5	46	49	0
30	22	46	30	2

Untersuchte bindige Böden:

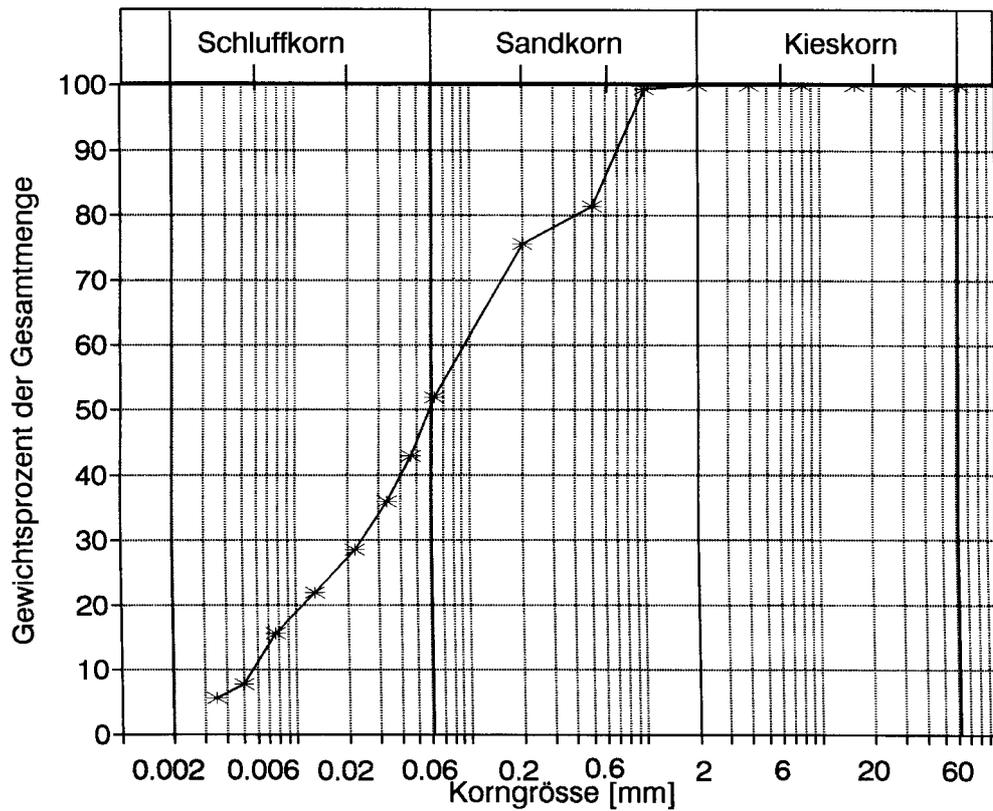
Die untersuchten bindigen Böden (Tab. 3) sind dem Bereich 1 (Bindiges Verhalten, Abb. 2) zuzuordnen. Ab einem Grenzwert von 15 % bis 20 % Ton und Schluff stützen sich die Körner der Grobfraction (>0,063 mm) nicht mehr gegeneinander ab. Der Anteil der Feinfraction fügt sich aus Quarz, Feldspat, Glimmer, Tonmineralen und löslichen Komponenten, wie z. B. Karbonaten zusammen.

Eine Besonderheit stellen die Tone (Probe 26, 28, 29) aus den Hydrobienschichten Frankfurt (Abb. 7) dar.



**Abb. 7** Frankfurter Tertiär: Schematischer West - Ost - Schnitt (SCHETELIG, KLIESCH & PETERS, 1987).

Die Tonpartikel dieser Schicht bestehen aus größeren plättchenförmige Körpern, die auch nach längerer Dispersion in destilliertem Wasser und permanenter Behandlung in einem Rührer nicht zu dispergieren sind.



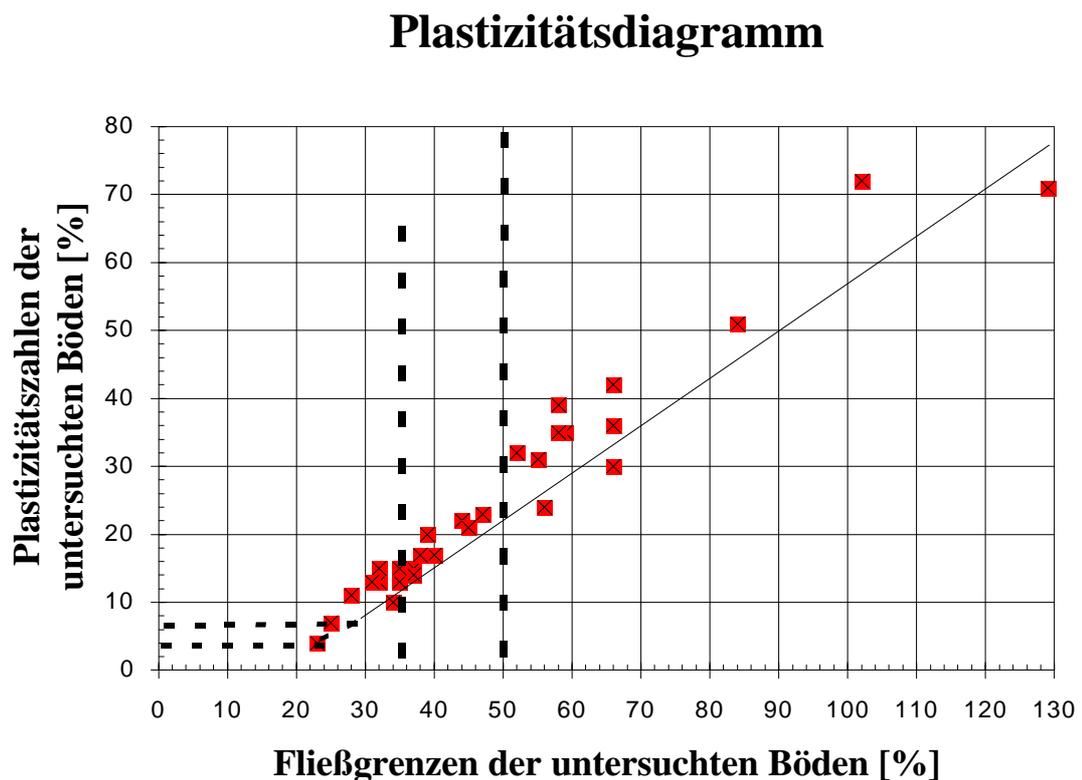
**Abb. 8** Kornverteilungskurve der Probe 29. Der Anteil der Tonfraktion beträgt 5 %. Der wahre Tonanteil ist durch die großen plättchenförmigen Tonpartikel auf andere Kornfraktionen verteilt.

Abbildung 8 zeigt, daß diese Partikel das Ergebnis der Kornverteilung verfälschen. Durch die großen Tonpartikel wird der Eindruck eines hohen Sandgehaltes erweckt. Dabei handelt es sich um einen Ton. Eine mechanische Zerstörung der Partikel wird nicht durchgeführt, da die Probe in natürlichem Zustand verfestigt werden soll.

B: Plastizität:

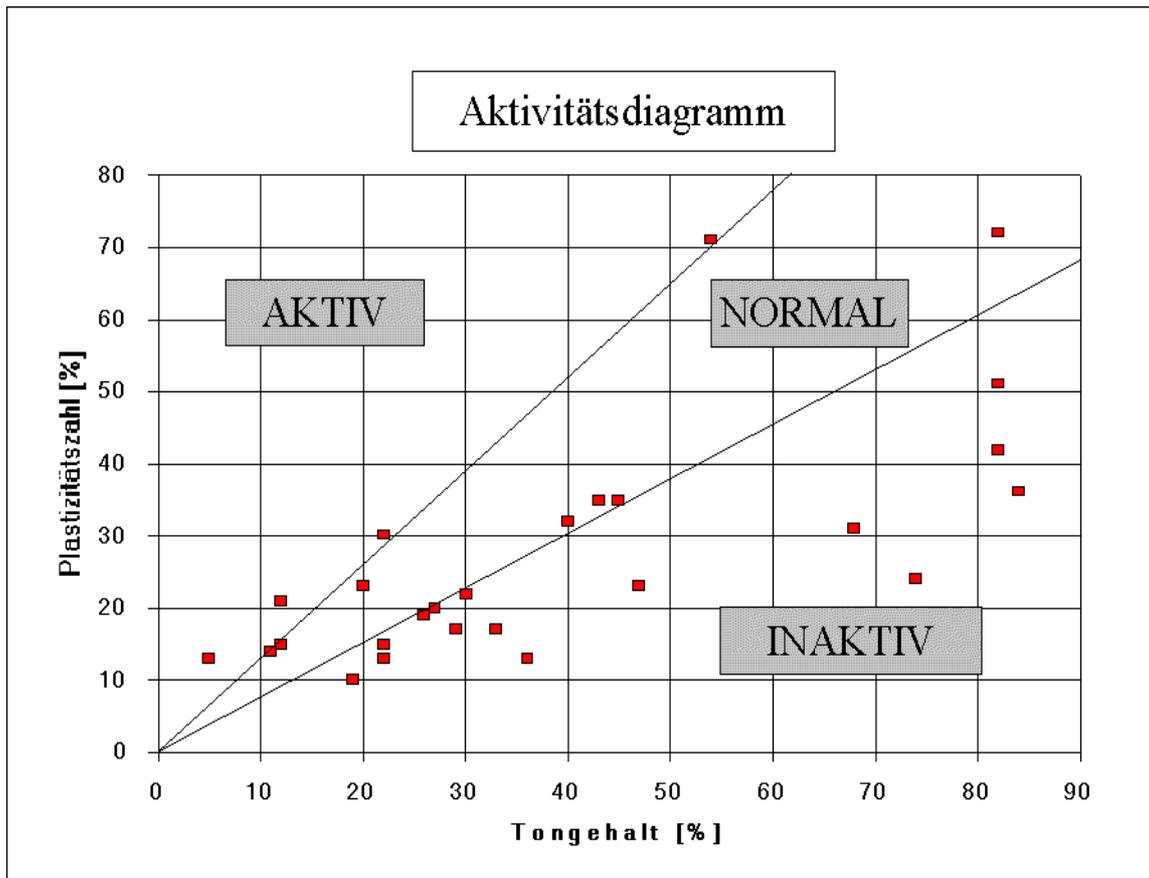
Die Plastizität ist ein wichtiges Bodenmerkmal bei Behandlung eines Tones mit Chemikalien. Unterschiedliche Plastizitäten haben Auswirkungen auf die Verfestigung beim Wassergehalt der Fließgrenze (vgl. Kapitel 5.2.4). Um die Materialeignung für ein Verfestigungsverfahren festzustellen, sollen Böden aus allen Plastizitätsbereichen geprüft werden.

Abbildung 9 gibt eine Übersicht der Fließgrenzen und Plastizitätszahlen der untersuchten Böden. Die Böden werden, um die Gruppenzugehörigkeit nach DIN 18196 darzustellen, in das Plastizitätsdiagramm (vgl. Abb. 3) nach CASAGRANDE (nach MUHS, 1980) eingetragen.



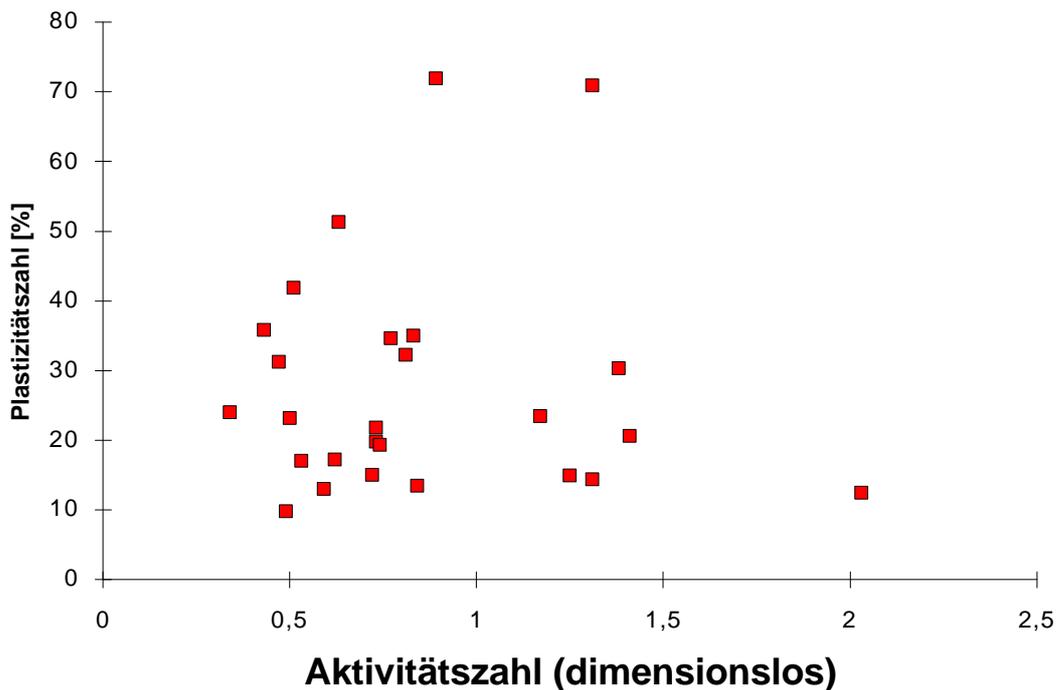
**Abb. 9** Einordnung der dreissig untersuchten Böden in das Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE (nach MUHS, 1980)

Die Auswertung der Aktivitätszahlen und die Einordnung in das Aktivitätsdiagramm, Abbildung 10 (nach MEYER-KRAUL, 1989; aus PRINZ 1997) ergibt, daß von 26 untersuchten Bodenproben nur vier dem "aktiven Bereich" zuzuordnen sind. Die übrigen Bodenproben enthalten nach diesem Diagramm keinen oder nur einen unwesentlichen Anteil an quellfähigen Tonmineralen.



**Abb. 10** Aktivitätszahlen von 26 untersuchten Böden mit leicht bis ausgeprägt plastischen Eigenschaften, dargestellt als Beziehung zwischen Plastizitätszahl und dem Tonanteil aus der Sieb- und Schlämmanalyse nach DIN 18123 (MEYER-KRAUL, 1989; aus PRINZ 1997). Die obere Linie kennzeichnet die Grenze ( $I_A=1,25$ ) zwischen aktiven und normal aktiven Tonmineralen. Die untere Linie ist die Grenze ( $I_A=0,75$ ) zwischen normal aktiven und inaktiven Tonmineralen.

Um Zusammenhänge zwischen Aktivitätszahl und der Plastizitätszahl und den folgenden Verfestigungsversuchen zu untersuchen wird in Abbildung 11 die Aktivitätszahl der Plastizitätszahl gegenübergestellt. Es ergibt sich kein Zusammenhang zwischen der Höhe der Aktivitätszahl und der Höhe der Plastizitätszahl.



**Abb. 11** Vergleich der Plastizitätszahl mit der Aktivitätszahl bei leicht bis ausgeprägt plastischen Tonen. Ein Zusammenhang zwischen der Aktivitätszahl und der Plastizitätszahl der dreissig untersuchten bindigen Böden ist nicht feststellbar.

## **4.4 Ergebnisse der Untersuchung zur Bodenverfestigung**

In den folgenden Kapiteln werden die Reaktionen bindiger Böden auf chemische Zusätze abgehandelt. Außerdem werden die optimalen Mengen der Chemikalien und die Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Festigkeit der behandelten Bodenproben ermittelt. Falls nicht anders erwähnt erfolgt das Zumischen von Chemikalien immer beim Wassergehalt der Fließgrenze, d. h. die Bodenproben befinden sich am Übergang von der flüssigen zur bildsamen Zustandsform.

### **4.4.1 Reaktion des Bodens bei Natriumkarbonatzusatz**

Wie schon angesprochen lassen sich bestimmte Tone durch Zusatz von Soda verflüssigen (Sodaaktivierung). Ob sich Böden mit dieser Eigenschaft besonders für eine Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen eignen, soll untersucht werden. Dazu werden sieben Böden, die eine deutliche Verflüssigungsreaktion bei Sodazugabe zeigen, auf ihre Festigkeit nach Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen geprüft.

Auswirkungen auf den Grad der Verfestigung durch die "Sodaaktivierung" können nicht festgestellt werden (Tabelle 4). Das bedeutet, daß zwischen der Aktivierbarkeit des verwendeten Tones und einer hohen Festigkeit nach Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen kein Zusammenhang besteht.

**Tabelle 4:** Zustandsänderung bei Sodazusatz und Scherfestigkeit der mit 4 % Soda und 15 % Wasserglas behandelten Bodenproben.

<b>Probe</b>	<b>Boden- gruppe nach DIN 18196</b>	<b>Soda- zusatz [%]</b>	<b>Zustands- änderung</b>	<b>Scherfestigkeit - undränniert [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Scherfestigkeit - dränniert [kN/m<sup>2</sup>]</b>
1	TM	4	Verflüssigung	749	180 (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )
3	TL	4	Versteifung	513	160 (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )
6	TM	4	Verflüssigung	551	155 (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )
9	TA	4	Versteifung	182	100 (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )
11	TA	4	Versteifung	114	115 (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )
12	OT	4	Verflüssigung	167	130 (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )
14	TM	4	Verflüssigung	241	140 (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )

#### 4.4.2 Reaktionen bei Wasserglaszusatz

Das Ergebnis der Versuche ist, daß mit Wasserglas allein keine Verfestigung zu erreichen ist. Die Untersuchung toniger Böden zeigt, daß im Gegensatz zu den Proben mit hohen Tongehalten sich bei den Proben mit niedrigen Tongehalten eine deutliche Verfestigung ergibt. Relativ "grobe" Sand/Schluff - Gemische sowie lößähnliche Böden mit sehr geringem Tongehalt zeigen langfristig nach dem Trocknen eine Verfestigung durch Aushärtung des Wasserglases (Tabelle 5). Im Unterschied zu dem Hydratonverfahren mit Zusatz von Natriumkarbonat und Wasserglas, benötigt die reine Wasserglasaushärtung sehr viel mehr Zeit und bildet an der Probenoberfläche eine glänzende Oberfläche aus, während die Probe im Inneren noch weich ist.

**Tabelle 5:** Auswirkungen des Zusatzes von 15 % Wasserglas zu stark und schwach tonigen Böden.

Probe	Wasserglaszusatz [%]	Tongehalt [%]	Scherfestigkeit - undrännert [kN/m <sup>2</sup> ], unbehandelt	Scherfestigkeit - undrännert [kN/m <sup>2</sup> ] nach 15 min.	Scherfestigkeit - undrännert [kN/m <sup>2</sup> ] nach 24 h
4	15	5	1	3	21
13	15	12	5	3	19
19	15	2	1	2	21
27	15	4	1	2	24
2	15	82	3	2	3
5	15	82	1	3	4
7	15	68	3	3	3
11	15	43	3	4	4

#### 4.4.3 Reaktionen bei Zusatz von Wasserglas und Kalziumchlorid

Kalziumchlorid und Wasserglas sind die wesentlichen Bestandteile des JOOSTEN -Verfahrens .

Bei den folgenden Versuchen wird untersucht, ob mechanisches Durchmischen der Böden mit Wasserglas-Soda-Gemischen die gleichen Ergebnisse, wie ein Durchmischen mit Wasserglas-Kalziumchlorid-Gemischen ergibt.

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Auswirkungen von Wasserglas-Soda-Gemischen sowie Wasserglas-Kalziumchlorid Gemischen auf die Festigkeit von vier bindigen Böden. Die Prüfung der undrännierten Scherfestigkeit erfolgte eine Stunde nach Zusatz der Chemikalien.

Probe	Scherfestigkeit - undränniert unbehandelt [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit undränniert [kN/m <sup>2</sup> ], Zusatz von Wasserglas- Soda-Gemischen	Scherfestigkeit undränniert [kN/m <sup>2</sup> ], Zusatz von Wasserglas und CaCl <sub>2</sub>
1	1	416	66
5	1	120	23
8	4	49	13
10	3	195	32

Wie aus Tabelle sechs ersichtlich ist, ergibt der Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen deutlich höhere Festigkeiten als der Zusatz von Wasserglas-Kalziumchlorid.

#### 4.4.4 Reaktionen bei Zusatz von Wasserglas und Natriumchlorid

Die Ergebnisse mit Wasserglas und Natriumchlorid zeigen, daß eine Verfestigung des Bodens mit diesen Chemikalien durchaus möglich ist. Die Scherfestigkeit erreicht trotz Erhöhen des Zusatzes von Natriumchlorid nicht so hohe Werte wie bei der Verwendung von Wasserglas und Natriumkarbonat (Tabelle 7). Natriumchlorid kann, wenn geringere Werte der Verfestigung gefordert sind bzw. kein Natriumkarbonat zur Verfügung steht, mit Einschränkung, als Ersatzstoff dienen.

**Tabelle 7:** Auswirkungen von Wasserglas-Soda-Gemischen sowie Wasserglas-Natriumchlorid Gemischen auf vier bindige Böden.

Probe	Scherfestigkeit - undrännert unbehandelt [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit-undrännert [kN/m <sup>2</sup> ], Zusatz von Wasserglas- Soda-Gemischen	Scherfestigkeit-undrännert [kN/m <sup>2</sup> ], Zusatz von Wasserglas- Natriumchlorid Gemischen
1	1	416	350
5	1	120	97
8	4	49	39
10	3	195	154

Die Prüfung der undrännerten Scherfestigkeit erfolgt eine Stunde nach Zusatz der Chemikalien. Der Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen ergibt höhere Scherfestigkeiten als bei Zusatz von Wasserglas und Natriumchlorid.

Dieses Verfahren ist derzeit noch nicht ausgereift und bedarf weiterer grundlegender Untersuchungen.

#### 4.4.5 Reaktionen bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen

Die Ergebnisse der Festigkeiten der behandelten Proben zeigen, daß durch Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemische bei vielen Proben, die flüssig bis weich sind, eine schnelle und effektive Verfestigung eintritt.

- Gute bis sehr gute Ergebnisse der Verfestigung zeigen leicht und mittelplastische Tone (Bodengruppe TL und TM nach DIN 18196).

**Tabelle 8:** Auswirkungen von Wasserglas-Soda-Gemischen auf Böden der Bodengruppen TL und TM nach DIN 18196.

Probe	Scherfestigkeit- undrännert, unbehandelt [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit -undrännert [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit- drännert [200 kN/m <sup>2</sup> Normalsp.]
1	1	749	180
3	5	513	160
6	3	551	155
14	7	241	140
15	9	438	150
16	4	687	160
17	5	273	135
18	6	377	150
20	5	198	145
21	11	294	153
22	14	302	147
25	1	162	138
29	4	158	160
30	3	131	165

- Löß, grobe Schluffe und bindige Sande (Bodengruppe TL und UL nach DIN 18196) mit einem Tongehalt  $\leq 12$  % lassen sich durch Wasserglas-Soda-Gemische nicht verfestigen.

**Tabelle 8:** Auswirkungen von Wasserglas-Soda-Gemischen auf Böden der Bodengruppen TL und UL nach DIN 18196. Der Tongehalt beträgt  $\leq 12\%$ .

Probe	Scherfestigkeit- undrännert, unbehandelt [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit -undrännert [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit -drännert [200 kN/m <sup>2</sup> Normalsp.]
4	1	41	183
13	5	40	153
19	1	41	155
27	1	42	158

- Ausgeprägt plastische Tone (Bodengruppe TA nach DIN 18196), mit Ausnahme von Probe 23 (vgl. Kapitel 5.2.3; Abhängigkeit der Verfestigung vom Anteil bestimmter Tonminerale), lassen sich nur nach einer materialabhängigen Reduzierung des Wassergehaltes effektiv verfestigen.

**Tabelle 9:** Auswirkungen von Wasserglas-Soda-Gemischen auf Böden der Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Probe	Scherfestigkeit- undrännert, unbehandelt [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit -undrännert [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit -drännert [200 kN/m <sup>2</sup> Normalsp.]
2	3	53	105
5	1	138	100
7	3	141	90
8	4	52	80
9	3	182	100
11	3	114	115
23	4	324	160
26	4	235	120
28	3	255	130

Tone mit organischen Beimengungen (Bodengruppe OT nach DIN 18196) reagieren sehr unterschiedlich auf den Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen. Aufschluß bezüglich der Anwendbarkeit des Verfahrens kann nur eine röntgenologische Untersuchung geben.

**Tabelle 10:** Auswirkungen von Wasserglas-Soda-Gemischen auf Böden der Bodengruppe OT nach DIN 18196.

Probe	Scherfestigkeit- undrännert, unbehandelt [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit -undrännert [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit -drännert [200 kN/m <sup>2</sup> Normalsp.]
10	3	274	153
12	6	167	130
24	7	68	25

Aus Tabelle 10 geht hervor, daß genaue Aussagen, ob eine Verfestigung mit Wasserglas und Soda anwendbar ist, allein basierend auf der Ermittlung der bodenmechanischen Kennwerte und der Einordnung nach DIN 18196 in bestimmte Bodengruppen, nicht möglich sind. Die Proben 10, 12 und 24 gehören nach DIN 18196 alle in die Bodengruppe OT (Tone mit organischen Beimengungen). Verfestigungsversuche der Bodengruppe OT mit Wasserglas-Soda-Gemischen ergeben sehr unterschiedliche Festigkeiten. Um die Ursachen der unterschiedlichen Festigkeiten zu ergründen sind zusätzliche Untersuchungen z. B. röntgenologische Untersuchungen notwendig.

#### 4.4.6 Der optimale Zusatz von Wasserglas und Soda bei dem Wassergehalt der Fließgrenze

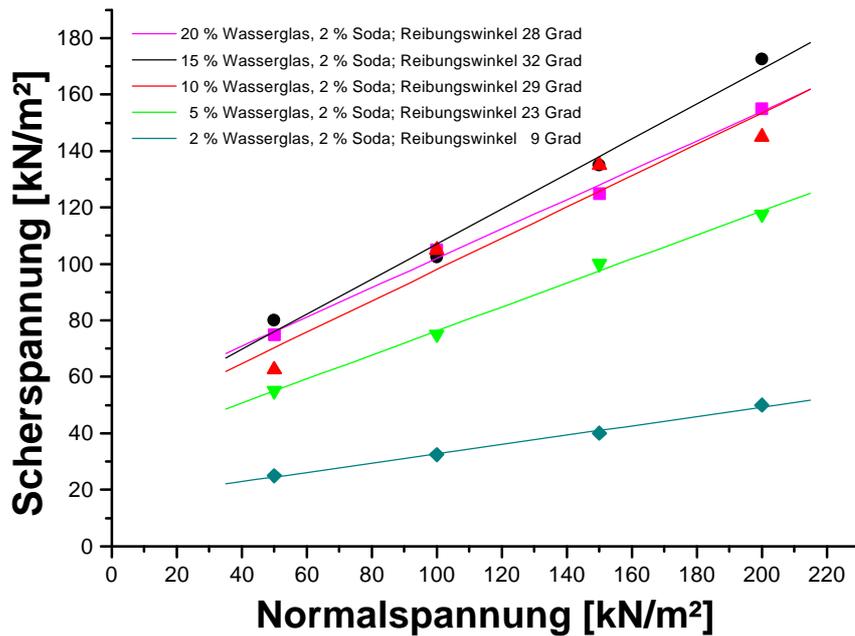
Die folgenden Untersuchungen der undränierten und dränierten Scherfestigkeit sowie des Reibungswinkels ergeben, daß an der Fließgrenze bei einem Zusatz von 2-4 % Soda sowie 15 % Wasserglas die höchste Verfestigung (Abb. 13, 14, 15 und 16) zu erreichen ist. Ein darüber hinaus erhöhter Zusatz der Chemikalien führt eher zu einer Verschlechterung des Ergebnisses. Beispielhaft werden drei Bodengruppen mit unterschiedlichen plastischen Eigenschaften dargestellt:

A: Mittelplastischer Ton (Probe 1)

Zu einem mittelplastischen Ton werden beim Wassergehalt der Fließgrenze unterschiedliche Anteile von Wasserglas und Soda zugegeben und die Auswirkungen auf die Scherfestigkeit (Tab. 11, Abb. 12) kontrolliert. Der optimale Zusatz besteht aus 15 % Wasserglas und 2 % Soda. Eine Erhöhung des Zusatzes bewirkt ein Absinken der Festigkeit. Schon ab 5 % Wasserglas und 2 % Soda verbessern sich die Festigkeit und der Reibungswinkel deutlich.

**Tabelle 11:** Auswirkungen von fünf unterschiedlichen Zusätzen auf die Scherspannung und den Reibungswinkel. Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze (Probe 1; mittelplastischer Ton aus Haiterbach).

<b>Probe 1</b>					
Wasserglas [%]	20	15	10	5	2
Soda [%]	2	2	2	2	2
Wassergehalt [%]	47,34	47,34	47,34	47,34	47,34
Normalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherspannung [kN/m <sup>2</sup> ]				
50	75	80	62,5	55	25
100	105	102,5	105	75	32,5
150	125	135	135	100	40
200	155	172,5	145	117,5	50
φ' [Grad]	28	32	29	23	9



**Abb. 12** Ermittlung der Scherparameter für fünf unterschiedliche Wasserglas-Soda-Gemische. Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze.

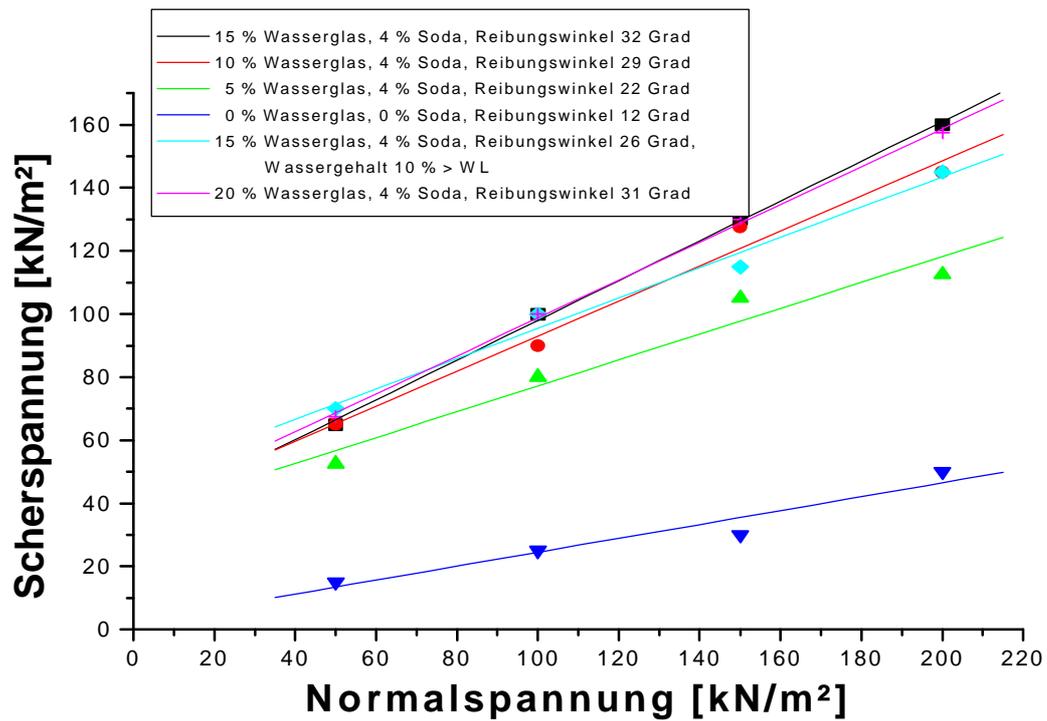
In Abbildung 12 wird der prozentuale Anteil an Wasserglas von 2 auf 20 % gesteigert, um die Auswirkungen auf den Reibungswinkel und die Kohäsion eines **mittelplastischen** Tones (Probe 1, roter Ton aus Haiterbach) zu bestimmen. Der Zusatz erfolgt an der Fließgrenze. Bei 15 % Wasserglas und 2 % Soda ergibt sich ein Maximum der Festigkeit. Eine Erhöhung des Zusatzes verschlechtert die Ergebnisse.

B: Leichtplastischer Ton (Probe 3)

Zu einem leichtplastischen Ton werden beim Wassergehalt der Fließgrenze unterschiedliche Anteile von Wasserglas und Soda zugegeben und die Auswirkungen auf die Scherfestigkeit (Tab. 12, Abb. 13) kontrolliert. Der optimale Zusatz besteht aus 15 % Wasserglas und 2 % Soda. Eine Erhöhung des Zusatzes bewirkt ein Absinken der Festigkeit. Schon ab 5 % Wasserglas und 4 % Soda verbessern sich die Festigkeit und der Reibungswinkel deutlich. Bei diesem Beispiel wird, um einen Extremfall darzustellen, der Wassergehalt um 10 % über den Wassergehalt der Fließgrenze erhöht. Auch in diesem Fall ist durch Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen noch eine befriedigende Verfestigung festzustellen.

**Tabelle 12:** Auswirkungen des unterschiedlichen Chemikalzusatzes auf die Scherspannung und den Reibungswinkel. Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze ( $w_L = 35\%$  Wassergehalt; Probe 3; **leicht plastischer** Ton, Lokalität "Am Eichelberg"). Der optimale Zusatz liegt bei 15 % Wasserglas und 4 % Soda.

<b>Probe 3</b>						10%> $w_L$
Wasserglas [%]	20	15	10	5	0	15
Soda [%]	4	4	4	4	0	4
Wassergehalt [%]	35	35	35	35	35	45
Normalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherspannung [kN/m <sup>2</sup> ]					
50	67,5	65	65	52,5	15	70
100	100	100	90	80	25	100
150	130	130	127,5	105	30	115
200	157,5	160	145	112,5	50	145
$\phi'$ [Grad]	31	32	29	22	12	26



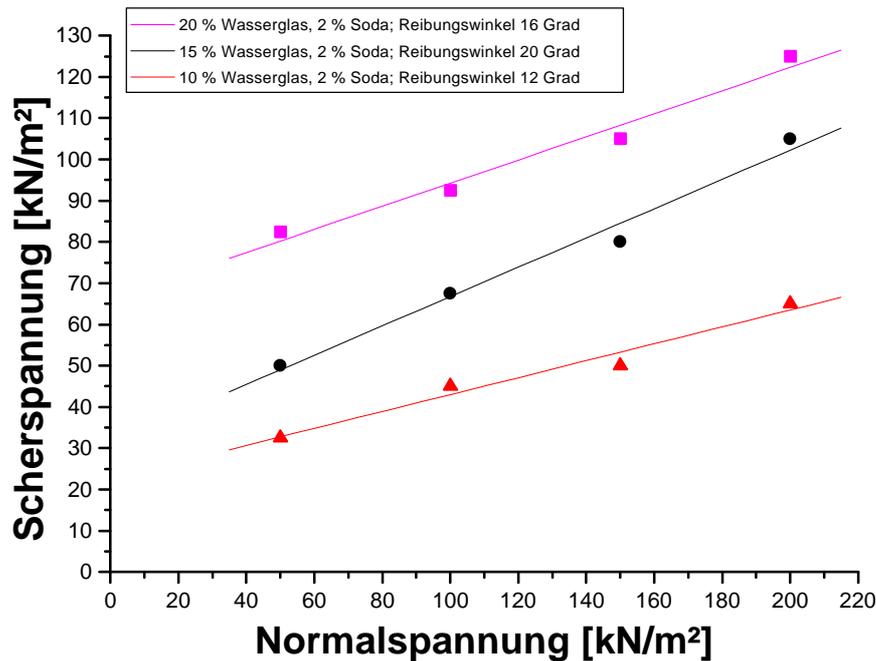
**Abb. 13** Ermittlung der Scherparameter für sechs unterschiedliche Zusätze (Probe 3; leicht plastischer Ton, Lokalität "Am Eichelberg"). Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze ( $w_L = 35\%$  Wassergehalt). Bei 15 % Wasserglas und 4 % Soda ergibt sich ein Maximum. Weiterer Zusatz verschlechtert die Ergebnisse.

C: Ausgeprägt plastischer Ton (Probe 2, grün-gelber Ton aus Malsch)

Zu einem ausgeprägt plastischen Ton werden beim Wassergehalt der Fließgrenze unterschiedliche Anteile von Wasserglas und Soda zugegeben und die Auswirkungen auf die Scherfestigkeit (Tab. 13, Abb. 14) kontrolliert. Der optimale Zusatz besteht aus 15 % Wasserglas und 2 % Soda. Bei der dränierten Scherfestigkeit tritt zwar, bei Steigerung auf 20 % Wasserglaszusatz, noch eine leichte Erhöhung der Festigkeit ein, der Reibungswinkel verschlechtert sich jedoch deutlich.

**Tabelle 13:** Auswirkungen des unterschiedlichen Zusatzes auf die Scherspannung und den Reibungswinkel. Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze ( $w_L = 84\%$  Wassergehalt) bei Probe 2, einem **ausgeprägt plastischen** Ton aus Malsch.

<b>Probe 2</b>			
Wasserglas [%]	20	15	10
Soda [%]	2	2	2
Wassergehalt [%]	83,66	83,66	83,66
Normalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherspannung [kN/m <sup>2</sup> ]		
50	82,5	50	32,5
100	92,5	67,5	45
150	105	80	50
200	125	105	65
$\varphi'$ [Grad]	16	20	12



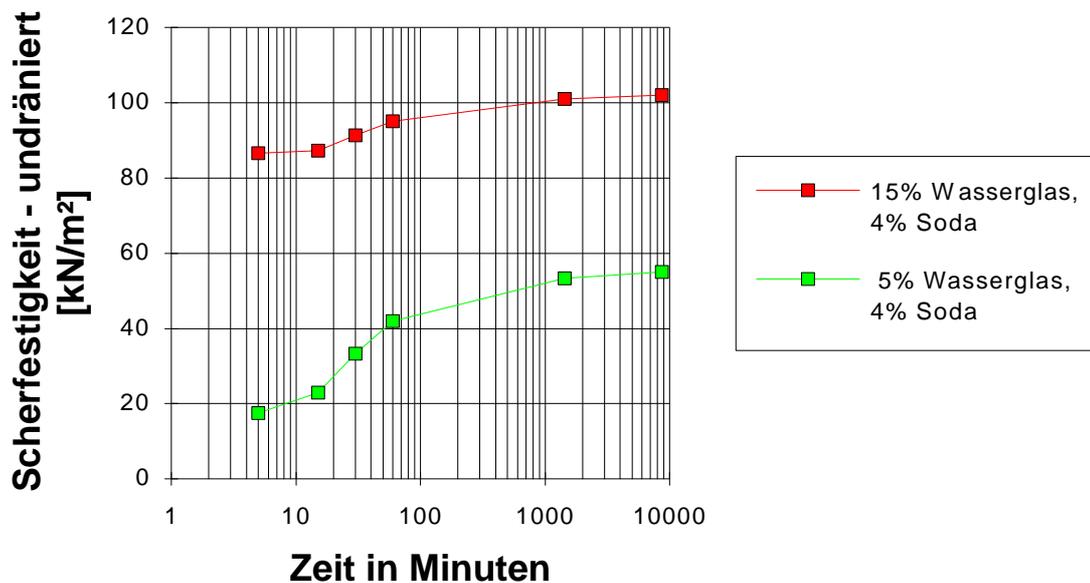
**Abb. 14** Ermittlung der Scherparameter für drei unterschiedliche Chemikalzusätze.  
 (Probe 2; **ausgeprägt plastischer** Ton aus Malsch) Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze ( $w_L = 84$  % Wassergehalt).

#### 4.4.7 Zeitlicher Ablauf der Verfestigung nach Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen

Die Untersuchung des zeitlichen Ablaufs der Verfestigung bei unterschiedlichem Gehalt von Wasserglas-Soda-Gemischen am Beispiel eines ausgeprägt plastischen Tones (Tab. 14, Abb. 15) zeigt, daß die Reaktion mit geringerer Konzentration von Wasserglas und Soda schneller abläuft als die Reaktion mit 15 % Wasserglas und 4 % Soda. Der Zusatz von 15 % Wasserglas und 4 % Soda ergibt aber eine wesentlich höhere Festigkeit. Die Verfestigungsreaktion kommt nach 24 Stunden sukzessiv zum Stillstand. Die Prüfung der Festigkeit ergibt keine Steigerungen mehr.

**Tabelle 14:** Auswertung der Kegelfallversuche für zwei unterschiedliche Zusätze in Abhängigkeit von der Zeit. Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze (Probe 2; **ausgeprägt plastischer** Ton aus Malsch). Die Reaktion mit der geringeren Konzentration läuft schneller ab und ergibt eine geringere Verfestigung.

<b>Probe 2</b>		
Wasserglas[%]	15	5
Soda [%]	4	4
Wassergehalt [%]	84	84
Zeit in Minuten	Scherfestigkeit-undränniert [kN/m <sup>2</sup> ]	
5	86	18
15	87	23
30	91	33
60	95	42
1440	101	53
8640	102	55



**Abb. 15** Scherfestigkeit (undränniert) in Abhängigkeit der Zeitdauer vom Zeitpunkt der Zumischung zweier unterschiedlicher chemischer Zuschläge (Probe 2; **ausgeprägt plastischer** Ton aus Malsch). Der Zusatz der Chemikalien erfolgt an der Fließgrenze ( $w_L = 84\%$  Wassergehalt).

#### 4.4.8 Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Verfestigung durch Wasserglas-Soda-Gemische

Dieses Kapitel gibt Aufschluß, ob durch Herabsetzen des Wassergehaltes eine effektivere Verfestigung erreicht werden kann. Dies betrifft vor allem ausgeprägt plastische Tone, die durch hohe Fließgrenzen nur ungenügend verfestigt werden können.

Der Wassergehalt der Probe 5 (Tab. 15, Abb. 16) an der Fließgrenze liegt bei 102,50 %. Der Ton wird mit 15 % Wasserglas und 4 % Soda verfestigt.

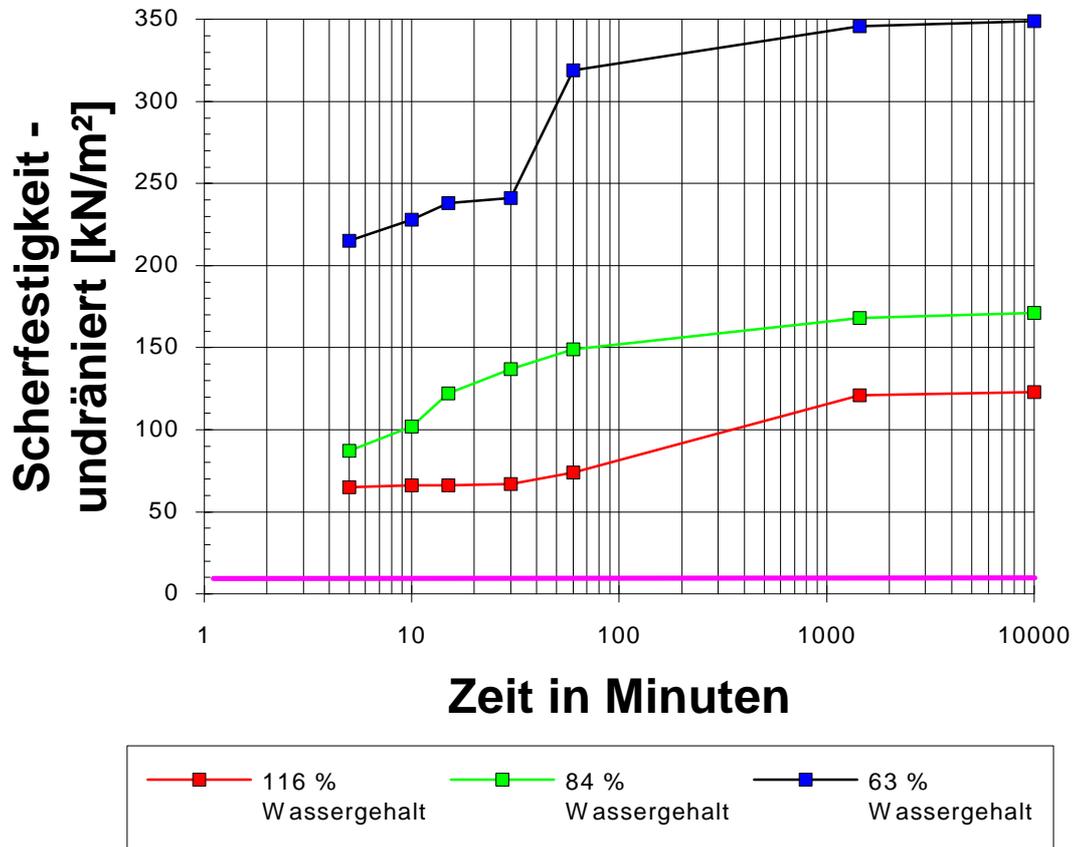
Das Beispiel zeigt, daß reduzieren des Wassergehaltes zu einer deutlichen Verbesserung der Festigkeit führt. Bei unverfestigtem Material liegt die undrained Scherfestigkeit für alle drei Wassergehalte unter 10 kN/m<sup>2</sup>.

**Tabelle 15:** Auswirkungen von drei Wassergehalten auf die undrained Scherfestigkeit (Probe 5; **ausgeprägt plastischer** Ton, industriell hergestellt).

<b>Probe 5</b>			
Wasserglas [%]	15	15	15
Soda [%]	4	4	4
Wassergehalt [%]	116%	84,43%	63,44%
Zeit in Minuten	Scherfestigkeit [kN/m <sup>2</sup> ]		
5	65	87	215
10	66	102	228
15	66	122	238
30	67	137	241
60	74	149	319
1440	121	168	346

Das Reduzieren des Wassergehaltes vor Anwendung von Wasserglas-Soda-Gemischen führt zu einer wesentlich höheren Festigkeit.

Bei unverfestigtem Material liegt die undrÄnierte Scherfestigkeit fÄr alle drei Wassergehalte unter 10 kN/m<sup>2</sup> (entspricht dem Bereich unterhalb der rosa Linie in Abb. 16).



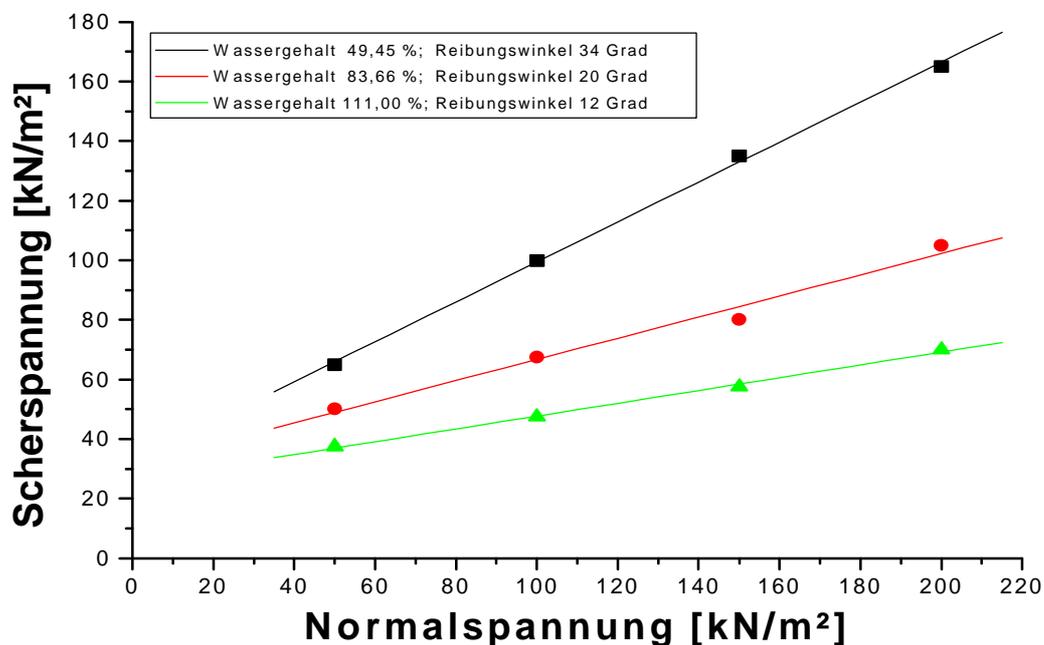
**Abb. 16** Auswirkungen von drei unterschiedlichen Wassergehalten (63 %, 84 %, 116 %) auf die undrÄnierte Scherfestigkeit (Kegelfallversuch) eines **ausgeprÄgt plastischen** Tones (Probe 5; industriell hergestellter Ton). Dargestellt wird der zeitliche Ablauf der Verfestigungsreaktion. Die rosa Linie kennzeichnet die Festigkeit des unbehandelten Materials.

Das Probenmaterial (Tab.16, Abb. 17) wird bei drei Wassergehalten (49,45 %, 83,66 %, 111 %) durch 15 % Wasserglas und 4 % Soda verfestigt. Die Scherparameter (drÄniert, Rahmenscherversuch) in unverfestigtem Zustand sind nicht mehr meßbar (das Bodenmaterial ist zu dÄnnflüssig).

Durch Absenken des Wassergehaltes um 20 - 30 % wird die Festigkeit deutlich erhöht. Ohne Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen befindet sich das Bodenmaterial bei den drei Wassergehalten in flüssiger bis breiiger Konsistenz.

**Tabelle 16:** Auswertung dräniertes Scherversuche in Abhängigkeit von drei Wassergehalten (Probe 2; **ausgeprägt plastischer** Ton aus Malsch).

<b>Probe 2</b>			
Wasserglas [%]	15	15	15
Soda [%]	4	4	4
Wassergehalt [%]	49,45	83,66	111
Normalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherspannung [kN/m <sup>2</sup> ]		
50	65	50	37,5
100	100	67,5	47,5
150	135	80	57,5
200	165	105	70
$\phi'$ [Grad]	34	20	12



**Abb. 17** Scherspannung als Funktion der Normalspannung in Abhängigkeit vom Wassergehalt eines **ausgeprägt plastischen** Tones (Probe 2; aus Malsch).

Abschließend kann festgestellt werden, daß Reduzieren des Wassergehaltes, die bei dem unbehandelten Bodenmaterial keine wesentliche Verbesserung der Stabilität bewirken würde, bei dem mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelten Material zu einer deutlichen Verbesserung der Bodenstabilität führt. Die Auswirkungen der Fließgrenze auf die Anwendbarkeit des Verfahrens und die erreichbaren Festigkeiten bei diesem Wert werden in Kapitel 5.2.4 erläutert.

## **4.5 Tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Verfestigungsexperimente**

### **4.5.1 Leicht bis mittelplastische Tone**

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Scherfestigkeiten und des Reibungswinkels, der mit Wasserglas-Soda-Gemischen (15 % Wasserglas und 4 % Soda) behandelten leicht- bis mittelplastischen Tone. Zusätzlich wird das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis ermittelt, um Zusammenhänge mit den Scherfestigkeiten zu überprüfen.

**Tabelle 17:** Ergebnisse der untersuchten leicht bis mittelplastischen Tone (Tongehalt > 15 %) bezüglich Scherfestigkeit, Reibungswinkel und Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis.

Probe	Scherfestigkeit- undrännert [kN/m <sup>2</sup> ]	Illit/Kaolinit - [001] Basisreflex- verhältnis	Reibungswinkel $\varphi'$ [Grad]	Scherfestigkeit- drännert [200 kN/m <sup>2</sup> Normalsp.]
1	749	24,5	32	180
3	513	5,5	32	160
6	551	1	34	155
14	241	0,4	28	140
15	438	5,9	29	150
16	687	1,6	33	160
17	273	1	28	135
18	377	1,2	33	150
20	198	6,2	31	145
21	294	11,3	32	153
22	302	0,4	31	147
25	162	1,4	26	138
29	158	1,3	31	160
30	131	3,8	31	165

#### 4.5.2 Ausgeprägt plastischeTone und Tone mit organischen Beimengungen

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Scherfestigkeiten und des Reibungswinkels, der mit Wasserglas-Soda-Gemischen (15 % Wasserglas und 4 % Soda) behandelten ausgeprägt plastischen Tone und Tone mit organischen Beimengungen. Zusätzlich wird das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis ermittelt, um Zusammenhänge mit den Scherfestigkeiten zu überprüfen.

**Tabelle 18:** Ergebnisse der untersuchten ausgeprägt plastischen Tone bezüglich Scherfestigkeit, Reibungswinkel und Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis.

Probe	Scherfestigkeit- undrännert [kN/m <sup>2</sup> ]	Illit/Kaolinit - [001] Basisreflex- verhältnis	Reibungswinkel $\varphi'$ [Grad]	Scherfestigkeit -drännert [200 kN/m <sup>2</sup> Normalsp.]
2	53	0,3	20	105
5	138	0,1	15	100
7	141	0,4	17	90
8	52	0,3	16	80
9	182	0,1	16	100
10 (OT)	274	1,5	31	153
11	114	1	25	115
12 (OT)	167	0,1	20	130
23	324	0,9	29	160
24 (OT)	68	nicht bestimmt	1	25
26	235	0,1	22	120
28	255	0,1	24	130

#### 4.5.3 Grobe Schluffe, lößähnliche Böden und bindige Sande

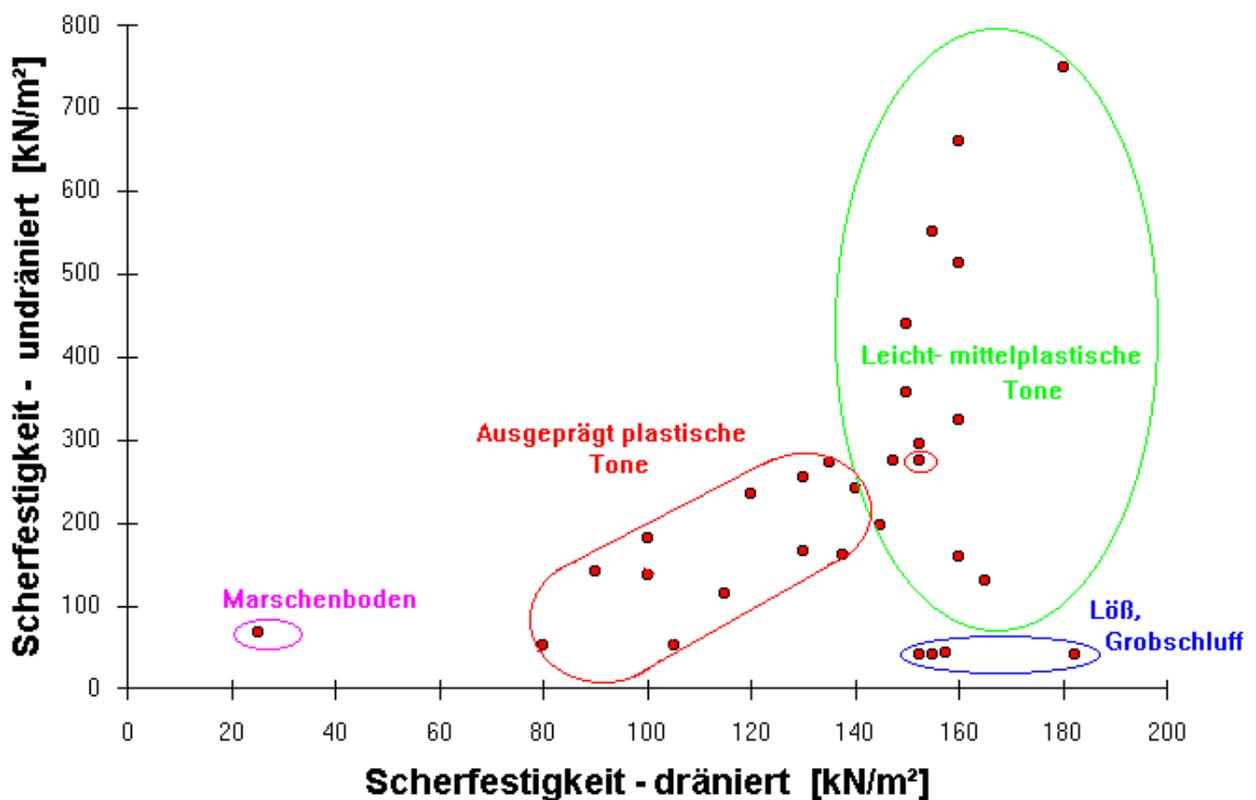
Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Scherfestigkeiten und des Reibungswinkels, der mit Wasserglas-Soda-Gemischen (15 % Wasserglas und 4 % Soda) behandelten Schluffe, lößähnliche Böden und bindige Sande. Die Böden werden nach DIN 18196 in die Bodengruppen TL oder UL eingeordnet, sind aber auf Grund ihres geringen Tongehaltes (< 12 %) nicht mehr für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda Gemisch geeignet.

**Tabelle 19:** Ergebnisse der untersuchten groben Schluffe und bindige Sande.

Probe	Scherfestigkeit- undrännert [kN/m <sup>2</sup> ]	Reibungswinkel $\varphi'$ [Grad]	Scherfestigkeit-drännert [200 kN/m <sup>2</sup> Normalsp.]
4	41	40	183
13	40	33	153
19	41	35	155
27	42	35	158

#### 4.5.4 Ergebnisse der Verfestigung aller untersuchten Proben

Die folgende Abbildung (Abb. 18) gibt eine Übersicht über die Scherfestigkeiten aller untersuchten bindigen Böden nach dem Verfestigungsvorgang. Um die Unterschiede der erreichten Scherfestigkeiten, abhängig von der Bodengruppe zu verdeutlichen, werden die Bodengruppen mit Ellipsen unterschiedlicher Färbung gekennzeichnet.



**Abb. 18** Grafische Darstellung der Scherfestigkeiten aller Proben nach der Verfestigung.

Alle Proben (Abb. 18) werden an der Fließgrenze unter Zusatz von 4 % Soda und 15 % Wasserglas behandelt. Die dränierte Scherfestigkeit wird mit einer Normalspannung von 200 kN/m<sup>2</sup> gemessen.

## 5. Diskussion der Ergebnisse

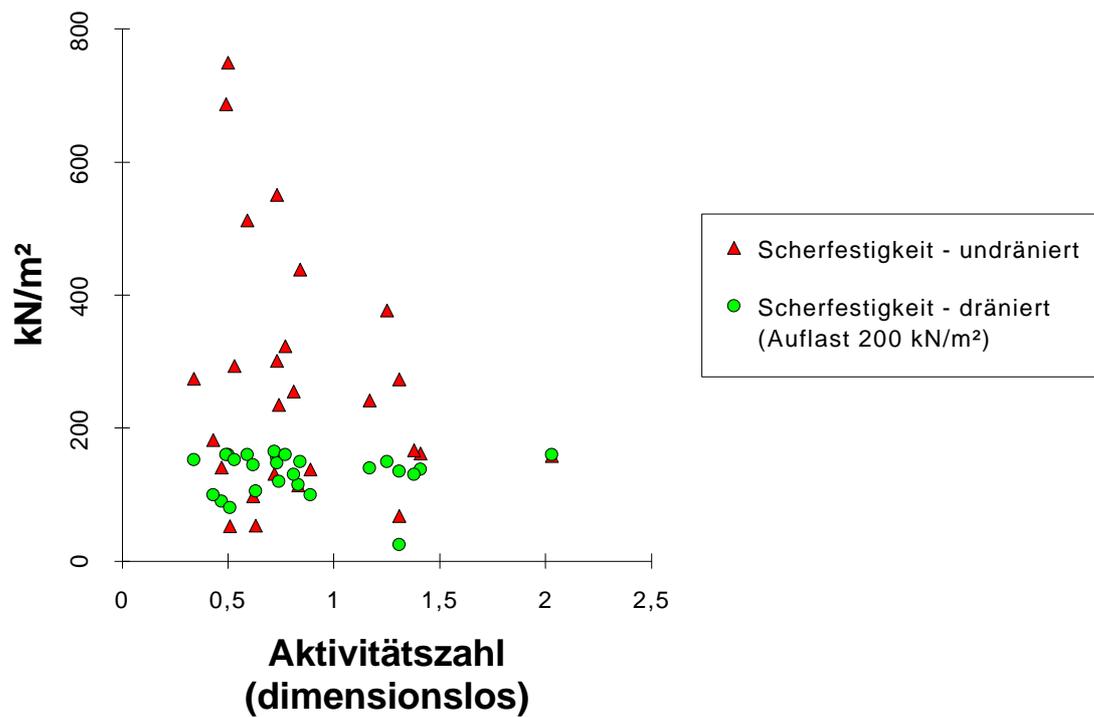
### 5.1 Abhängigkeit der Verfestigung von der Aktivitätszahl

Geprüft wird, ob hohe Aktivitätszahlen zur Verfestigung beitragen. Hohe Aktivitätszahlen bedeuten einen hohen Anteil quellfähiger Tonminerale. Quellfähige Tonminerale sind in hohem Maße zu Ionenaustauschvorgängen in der Lage. Hohe Aktivitätszahlen und hohe Festigkeiten könnten ein Merkmal für die Abhängigkeit des Verfahrens von quellfähigen Tonmineralen sein. Eine Gegenüberstellung der undrännierten Scherfestigkeit der mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelten Proben und der Aktivitätszahl ergibt keine Übereinstimmungen. Die Aktivitätszahl kann also nicht als Merkmal für die Funktionsfähigkeit des Verfahrens verwendet werden.

**Tabelle 20:** Gegenüberstellung der undrännierten Scherfestigkeit und der Aktivitätszahl. Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Höhe der Aktivitätszahl und der Höhe der Festigkeit.

Leicht bis mittelplastische Tone			Ausgeprägt plastische Tone		
Probennr.	Scherfestigkeit- undränniert kN/m <sup>2</sup>	Aktivitätszahl	Probennr.	Scherfestigkeit- undränniert kN/m <sup>2</sup>	Aktivitätszahl
1	749	0,5	2	53	0,6
3	513	0,6	5	138	0,9
6	551	0,7	7	141	0,5
14	241	1,2	8	52	0,5
15	438	0,8	9	182	0,4
16	660	0,5	10 (OT)	274	0,3
17	273	1,3	11	114	0,8
18	358	1,3	12 (OT)	167	1,4
20	198	0,6	23	324	0,8
21	294	0,5	24 (OT)	68	1,3
22	375	0,7	26	235	0,7
25	162	1,4	28	255	0,8
29	158	2,			
30	131	0,7			

Die Gegenüberstellung der Aktivitätszahl mit der Scherfestigkeit zeigt, daß die Eignung eines Bodens für die Verfestigung nicht über die Aktivitätszahl geprüft werden kann (Abb. 19).



**Abb. 19** Vergleich der Scherfestigkeit der mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelten Bodenproben mit der Aktivitätszahl. Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Aktivitätszahl und der Scherfestigkeit.

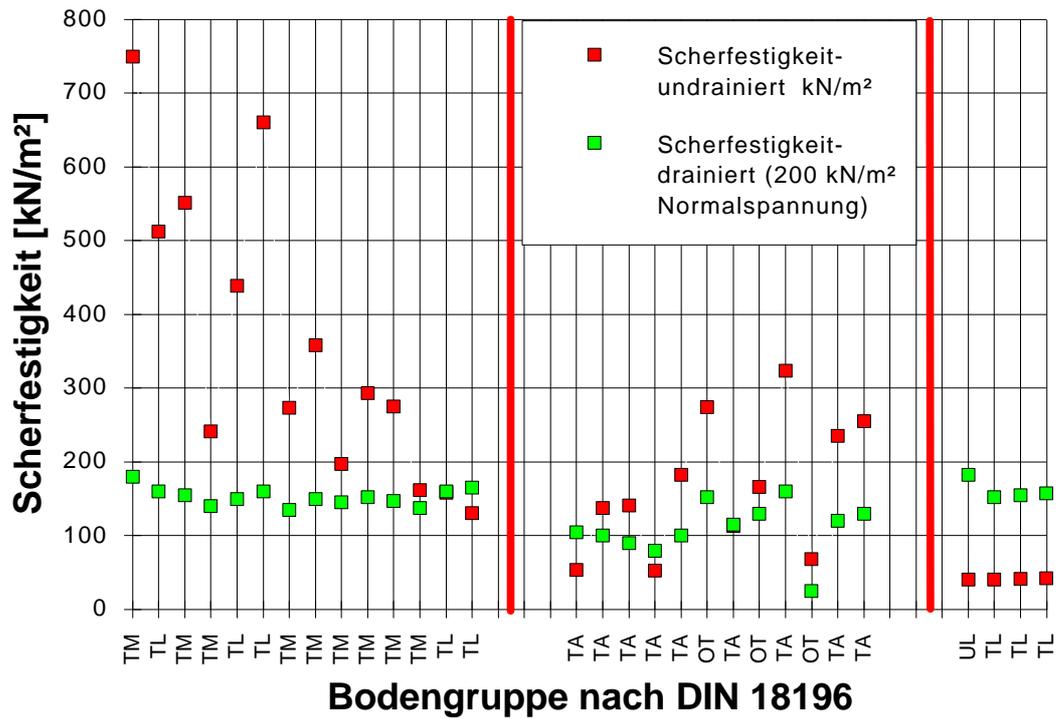
## **5.2 Abhängigkeit von der Bodenzusammensetzung**

Bei der Bodenverfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen werden folgende Aspekte der Bodenzusammensetzung auf ihren Einfluß auf das Verfahren geprüft:

1. die Abhängigkeit von der Bodengruppe nach DIN 18196
2. die Abhängigkeit vom prozentualen Tonanteil
3. die Abhängigkeit von der Art der Tonminerale (mineralogische Zusammensetzung)
4. die Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Fließgrenze

### **5.2.1 Abhängigkeit von der Bodengruppe nach DIN 18196**

Leicht- bis mittelplastische Tone (linke Gruppe in Abb. 20) erreichen die höchsten Festigkeiten. Ausgeprägt plastische Tone und Tone mit organischen Beimengungen (mittlere Gruppe in Abb. 20) erreichen geringere Festigkeiten. Leichtplastische Tone und Schluffe mit geringen Ton- und hohen Schluff- und Sandgehalten (rechte Gruppe in Abb. 20) erreichen bei der undränierten Scherfestigkeit sehr geringe Festigkeitswerte. Bei der dränierten Scherfestigkeit sind die Werte im Vergleich zu den übrigen untersuchten Bodengruppen relativ hoch. Dies hängt mit dem hohen Anteil an grobkörnigem Material, das der Scherbewegung besseren Widerstand leistet, zusammen. Vor allem bei den beiden erstgenannten Gruppen gibt es Bodenproben, die keine genaue Beurteilung bezüglich der Abhängigkeit der Festigkeit von der Bodengruppe zulassen, z. B. gibt es leicht- bis mittelplastische Tone, die sich relativ schlecht verfestigen lassen, dafür lassen sich einige ausgeprägt plastische Tone relativ gut verfestigen.



**Abb. 20:** Ergebnisse der Festigkeiten der dreissig untersuchten Bodenproben. Die Bodenproben werden mit 15 % Wasserglas und 4 % Natriumkarbonat behandelt.

Allein aufgrund der Gruppeneinteilung nach DIN 18196 ist eine Beurteilung der Böden für die Eignung auf die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen nur ungenügend möglich.

## 5.2.2 Abhängigkeit vom Tongehalt

Abbildung 21 zeigt die Auswirkungen des Tongehaltes auf die Festigkeit der mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelten Proben. Problematisch ist, daß sowohl Tonteilchen als größere Plättchen vorkommen können als auch, daß in der Tonfraktion (ermittelt aus der Korngrößenverteilung nach DIN 18123) z. B. ein unterschiedlich hoher Anteil an Quarz vorkommen kann. Beispielhaft erkennbar wird diese Problematik im Bereich von 11 % bis 12 % Tongehalt.

In diesem Bereich gibt es Proben, die sich gut und Proben, die sich schlecht verfestigen lassen. Dies läßt den Schluß zu, daß die 11 % bis 12 % Feinmaterial aufgrund unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung unterschiedlich auf den Zusatz mit Wasserglas-Soda-Gemischen reagieren.

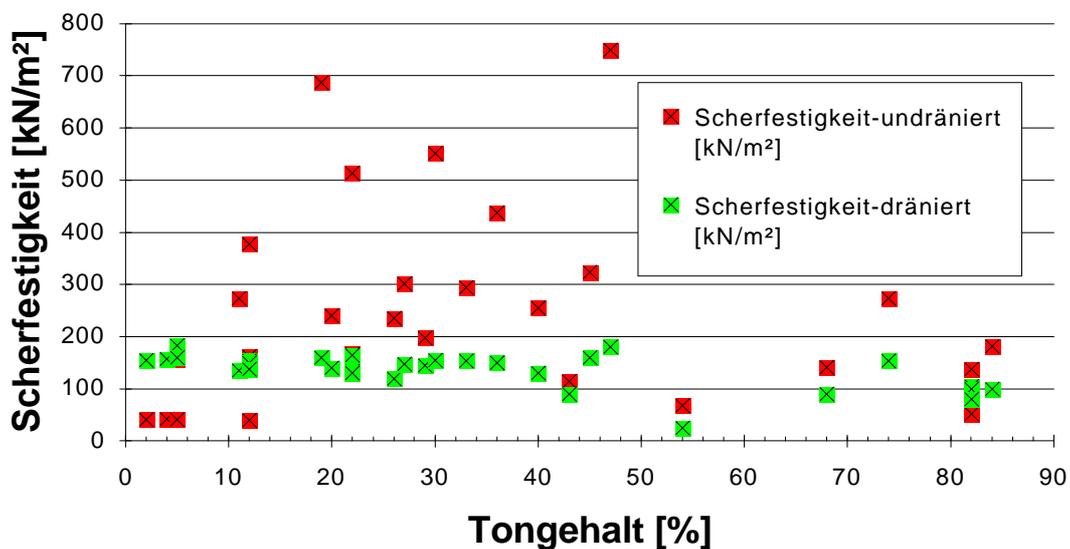


Abb. 21: Abhängigkeit der verfestigten Bodenproben vom Tongehalt.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung auf Abhängigkeit der Festigkeit vom Tongehalt kann gefolgert werden, daß mindestens ein Anteil von 11 % Ton für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen notwendig ist.

Zusätzlich wird deutlich, daß die Art der Tonminerale und nicht der Gesamtanteil an Ton für die Festigkeit von Bedeutung ist.

Das Verhalten von Mischböden aus z. B. Quarzsand und anderen Bestandteilen auf den Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen und Tonen untersuchte STRIEGLER 1963. Bei diesen Untersuchungen ergab sich, daß sich behandelte Tone als Zuschlagstoffe zur Verbesserung weniger geeigneter Bodenmaterialien verwenden lassen. STRIEGLER untersuchte diese Eigenschaft um Einsparungen bei dem reaktionsfähigen (für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen geeignetem Tonmaterial) vorzunehmen. Welche Festigkeiten bei Gemischen aus z. B. Sanden und reaktionsfähigen Tonen erreichbar sind, ist von dem Mengenanteil und der Art des verwendeten Tons abhängig. Genauere Aussagen können nur nach Materialprüfungen, die tonmineralogische Untersuchungen mit einschließen, gemacht werden.

### **5.2.3 Abhängigkeit von der Art der Tonminerale**

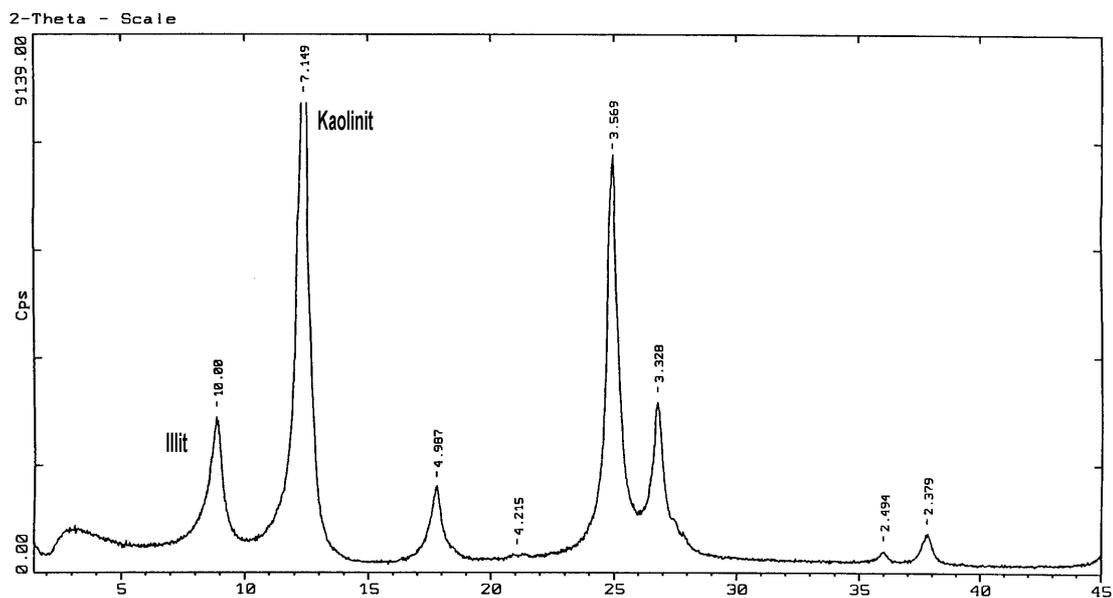
Röntgenographischen Untersuchungen ergeben, daß Zusammenhänge zwischen dem Anteil der Minerale Kaolinit, Illit und dem Grad der Verfestigung bestehen. Illitreiche Böden liefern bei der Verfestigung mit Wasserglas-Soda Gemisch gute Ergebnisse. Illit ist ein Dreischichtmineral das in der Lage ist, Ionen an den Oberflächen als auch in den Zwischenschichten einzulagern.

Bei anderen Tonmineralen, wie z. B. Montmorillonit, Smektit oder Chlorit, können keine Einflüsse auf die Verfestigung festgestellt werden.

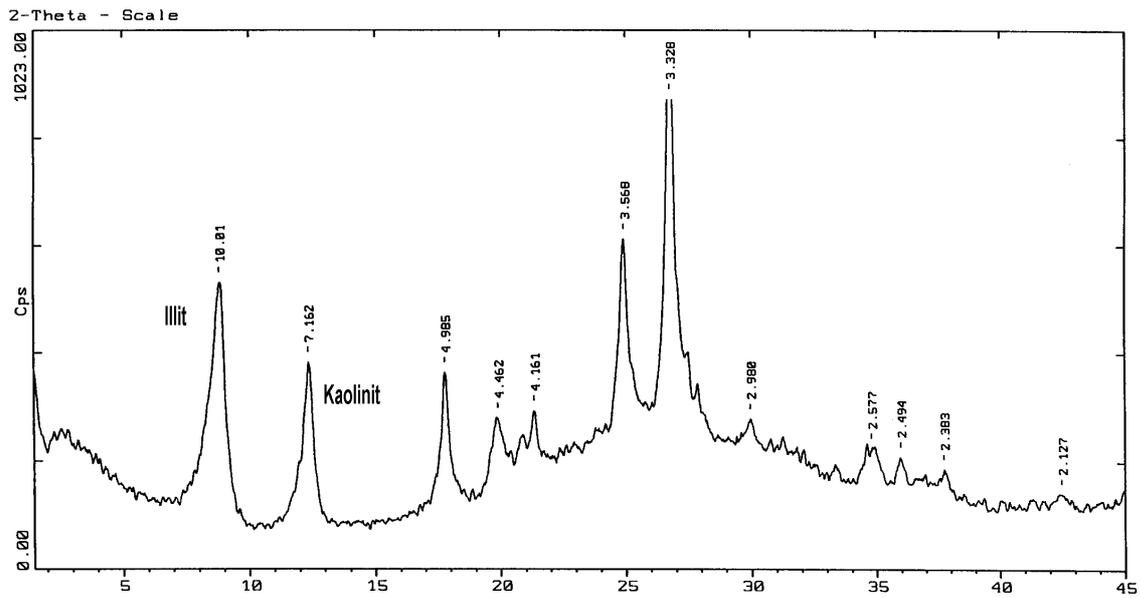
Die Auswirkungen des Unterschiedlichen Anteils von Illit und Kaolinit wird bei den Proben aus Eisenberg besonders deutlich. Die Proben stammen aus verschiedenen Schichten der Tongruben der Firma Fuchs.

In den Röntgendiagrammen und im Grad der Verfestigung zeigen sich deutliche Unterschiede. In allen vier Proben sind die gleichen Minerale vorhanden. Jedoch weisen die verschiedenen [001] - Basisreflexintensitäten der Minerale Kaolinit und Illit Unterschiede auf.

Das [001] - Basisreflexintensitätsverhältnis von Illit und Kaolinit beträgt in den Abbildungen 22a 0,4 und in 22b 1,5.

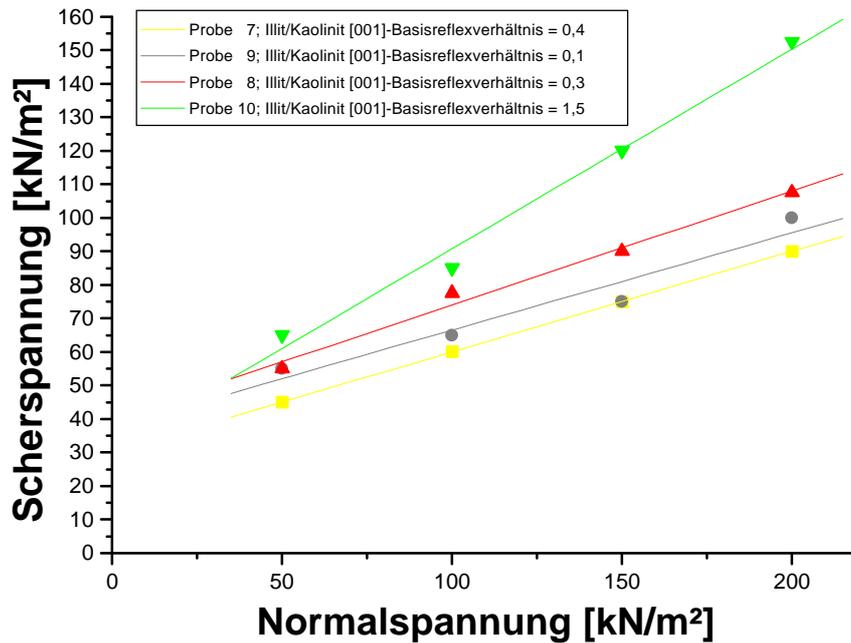


**Abb. 22a** Röntgendiagramm der Probe 7 (gelber, ausgeprägt plastischer Ton aus Eisenberg). Der [001] - Basisreflex von Illit ist niedriger, als der [001] - Basisreflex von Kaolinit. Die Probe ist für eine Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen bedingt geeignet.



**Abb. 22b** Röntgendiagramm der Probe 10 (grüner Ton mit org. Bestandteilen aus Eisenberg). Der [001] - Basisreflex von Illit ist höher, als der [001] - Basisreflex von Kaolinit. Die Probe lässt sich sehr gut verfestigen.

Durch den Zusatz von 15 % Wasserglas und 4% Soda beim Wassergehalt der Fließgrenze konnte die Probe 10 sehr gut verfestigt werden (Abb. 23), während die anderen 3 Proben weniger gute Ergebnisse liefern. Das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis kann ein Hinweis für die Eignung zur Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen sein.



**Abb. 23** Auswirkungen des unterschiedlichen Anteils an Tonmineralen auf die dränierte Scherfestigkeit bei drei ausgeprägt plastischen Tonen und einem Ton mit organischen Bestandteilen aus Eisenberg. Der grüne Ton (Probe 10, Bodengruppe OT) besitzt im Gegensatz zu den übrigen Proben ein hohes Illit/Kaolinit [001] -Basisreflexverhältnis. Diese Probe läßt sich gut verfestigen.

Beim Überprüfen aller leicht- bis ausgeprägt plastischen Bodenproben auf diese Charakteristika zeigt sich, daß fast alle Bodenproben mit hohem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis sehr gut verfestigt werden können (Abb. 24 und 25).

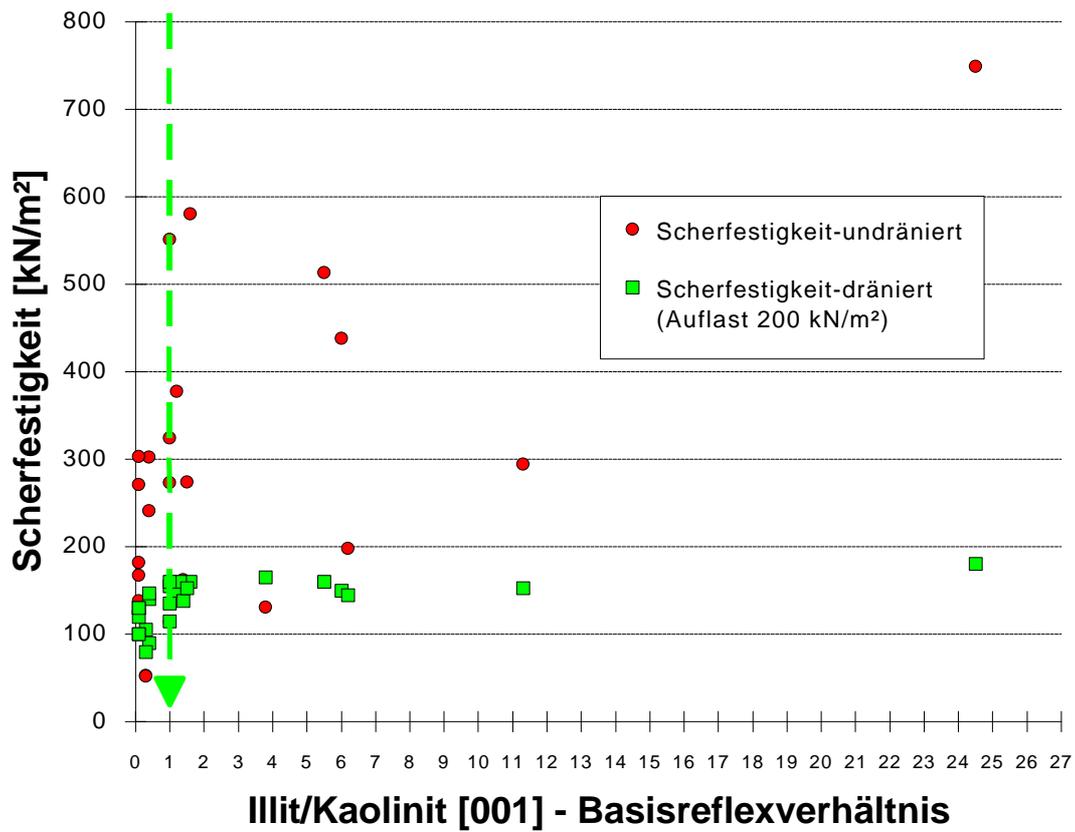
Besonders deutlich wird diese Tendenz beim Vergleich des Illit/Kaolinit-Verhältnisses mit dem Reibungswinkel (Abb. 25). Die Proben mit einem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $\geq 1$  weisen nach der Behandlung höhere Werte der Reibungswinkel als die Proben mit einem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $< 1$  auf.

Der Grund für die gute Verfestigung hängt mit der Reaktionsfähigkeit der Tonminerale Kaolinit und Illit zusammen. Illit ist durch die Fähigkeit Ionen einzulagern und Bindungen einzugehen reaktionsfähiger als Kaolinit.

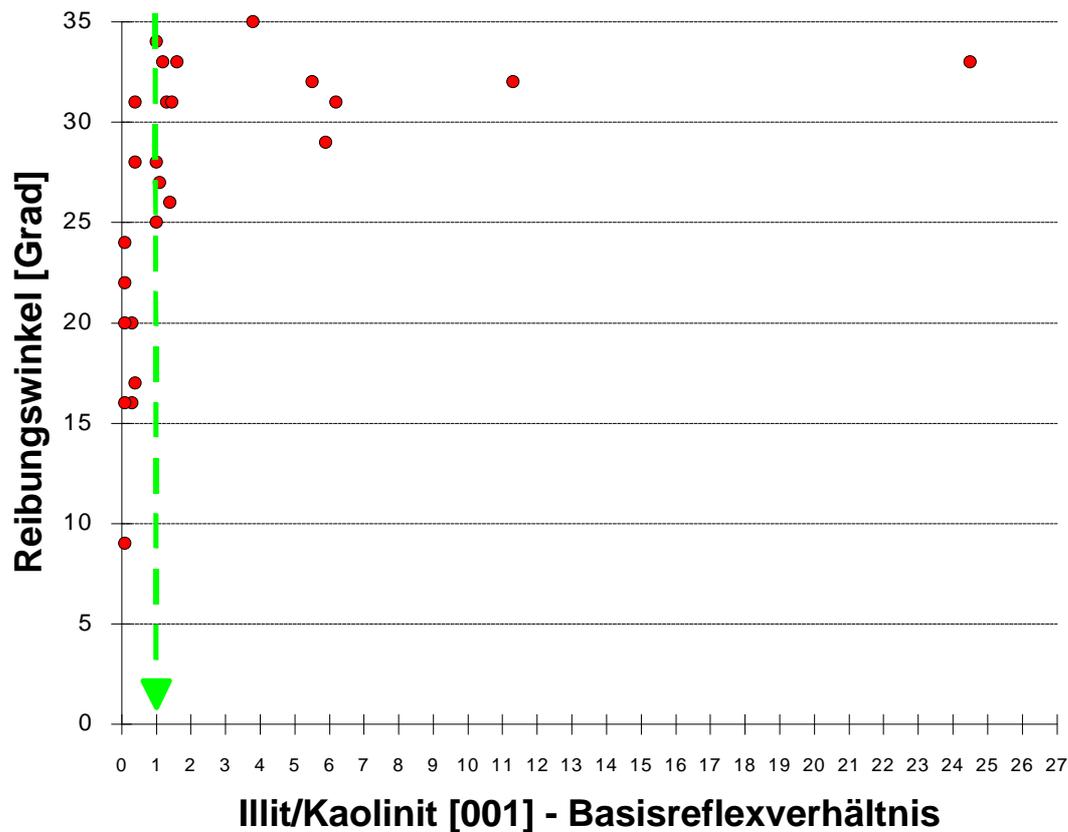
Zusammenfassend bedeutet dies:

Leicht- bis mittelplastische Tone mit hohen Verhältniszahlen der Kaolinit/Illit [001] - Basisreflexe können Hinweis für die Eignung zur Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen sein. Diese Charakteristika stellen kein absolutes Kriterium dar.

Die Fähigkeit des Zweischichtminerals Kaolinit zum Ionenaustausch ist im Gegensatz zu Illit sehr niedrig, da nur die Kanten und Oberflächen der Tonminerale für solche Reaktionen zur Verfügung stehen.



**Abb. 24:** Das Diagramm zeigt die Beziehungen zwischen Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnisses und Festigkeit. Der grüne Pfeil markiert das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis 1 (1 bedeutet, daß die Illit und Kaolinit [001] - Basisreflexe im Röntgendiagramm gleich hoch sind). Aus dem Diagramm geht hervor, daß Böden mit einem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $\geq 1$  in der Regel höhere Festigkeiten, als Böden mit einem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $< 1$  erreichen.



**Abb. 25:** Das Diagramm zeigt die Beziehung zwischen Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnisses und dem Reibungswinkel  $\varphi$  bei Behandlung mit 4 % Natriumkarbonat und 15 % Wasserglas. Der grüne Pfeil markiert das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis 1 (1 bedeutet, daß die Illit und Kaolinit [001] - Basisreflexe im Röntgendiagramm gleich hoch sind). Aus dem Diagramm geht hervor, daß Böden mit einem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $\geq 1$  in der Regel höhere Reibungswinkel, als Böden mit einem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $< 1$  erreichen.

Ausgehend davon, daß die Basisreflexhöhe der Antwortsignale (KRISCHNER, 1980) proportional zum Mengenanteil des jeweiligen Tonminerals in der Probe sind, bietet sich folgende Interpretation an:

- Der Illit - Basisreflex ist höher als der Kaolinit - Basisreflex. In der Probe ist, im Verhältnis zu Kaolinit, sehr viel Illit vorhanden. Das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis ist  $\geq 1$ . Proben, die diese Charakteristika aufweisen, lassen sich sehr gut verfestigen.

Der Kaolinit - Basisreflex ist höher als der Illit - Basisreflex. In der Probe ist, im Verhältnis zu Illit, sehr viel Kaolinit vorhanden. Das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis ist  $< 1$ . Proben, die diese Charakteristika zeigen, lassen sich weniger gut verfestigen.

Folglich müßte ein Ton mit bekannt hohem Kaolinitgehalt z. B. ein für die keramische Industrie geprüfetes Material schlechte Verfestigungseigenschaften aufweisen. Um diese Frage zu beantworten, wird ein Ton der Firma Villeroy & Boch mit bekannter mineralogischer Zusammensetzung untersucht. Der Ton mit der Bezeichnung "SUPER STANDARD PORCELAIN" weist folgende mineralogische Zusammensetzung auf (Angaben in Gew. %):

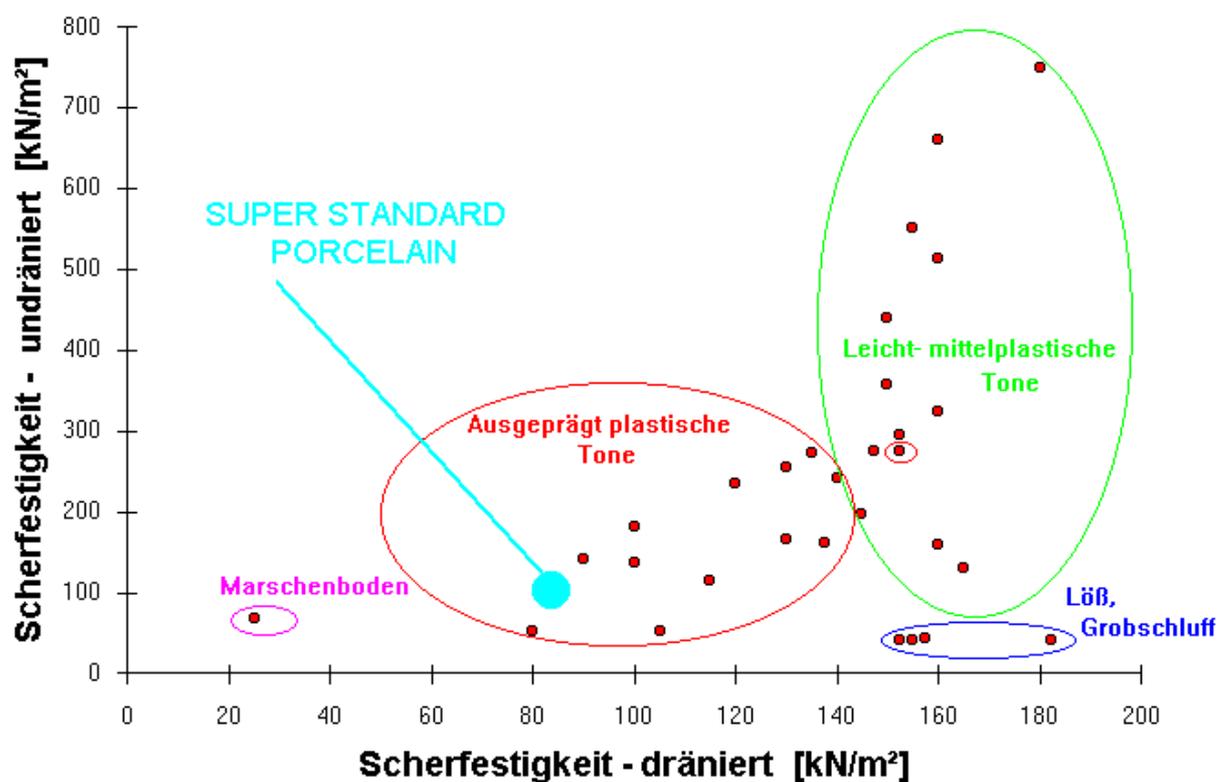
Kaolinit	93
Glimmerartiges Material	4
Feldspat	1
Weitere Mineralien	2

Das Material ist nach DIN 18196 ein ausgeprägt plastischer Ton (Kurzzeichen TA). Die Fließgrenze liegt bei 56 % Wassergehalt.

Die Ergebnisse der Verfestigung dieses Materials ergeben sehr niedrige Werte:

Scherfestigkeit -undrännert- [kN/m <sup>2</sup> ]	123
Scherfestigkeit -drännert (Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> )- [kN/m <sup>2</sup> ]	82
Reibungswinkel [Grad]	19,4

Abb. 26 zeigt den Vergleich der Festigkeiten aller untersuchten Proben mit dem "SUPER STANDARD PORCELAIN". Ein hoher Anteil an Kaolinit wirkt sich negativ auf die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen aus.

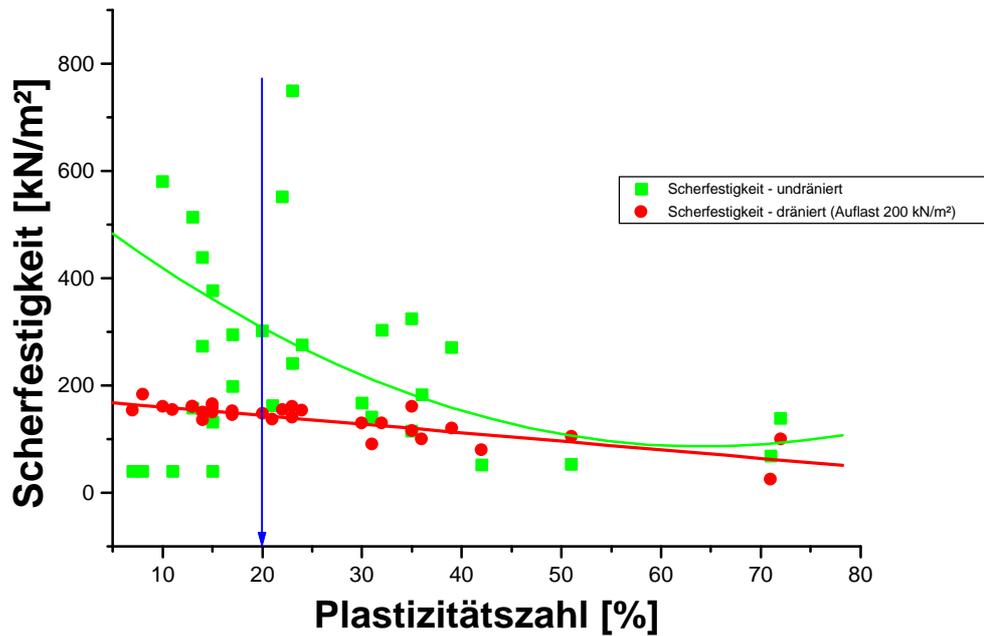


**Abb. 26** Zuordnung des Tones mit der Bezeichnung "SUPER STANDARD PORCELAIN" in Abb. 18 (Grafische Darstellung der Scherfestigkeiten aller Proben nach der Verfestigung).

Als Ergebnis der Untersuchungen läßt sich daher folgern, hohe Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältniszahlen können Hinweis für eine sehr gute Verfestigung sein (Abb. 24 und 25). Geht man von der geringen Reaktionsfähigkeit des Kaolinit aus, ist ein quantitativ hoher Anteil an Illit Indikator für eine gute Verfestigung.

#### **5.2.4 Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Fließgrenze**

Aus Abbildung 27 geht hervor, daß die Plastizität unterschiedliche Auswirkungen auf die Verfestigung hat. Die höchsten Festigkeiten können dem Bereich der Plastizitätszahl 10 - 35 zugeordnet werden. Mit zunehmender Plastizitätszahl sinken die gemessenen Festigkeiten (dargestellt durch die rote und die grüne Linie). Der blaue Pfeil kennzeichnet die Plastizitätszahl 20. Tone mit einer Plastizitätszahl unter 20 sind nach KEIL für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen unbrauchbar (vgl. Kapitel 5.3.4).

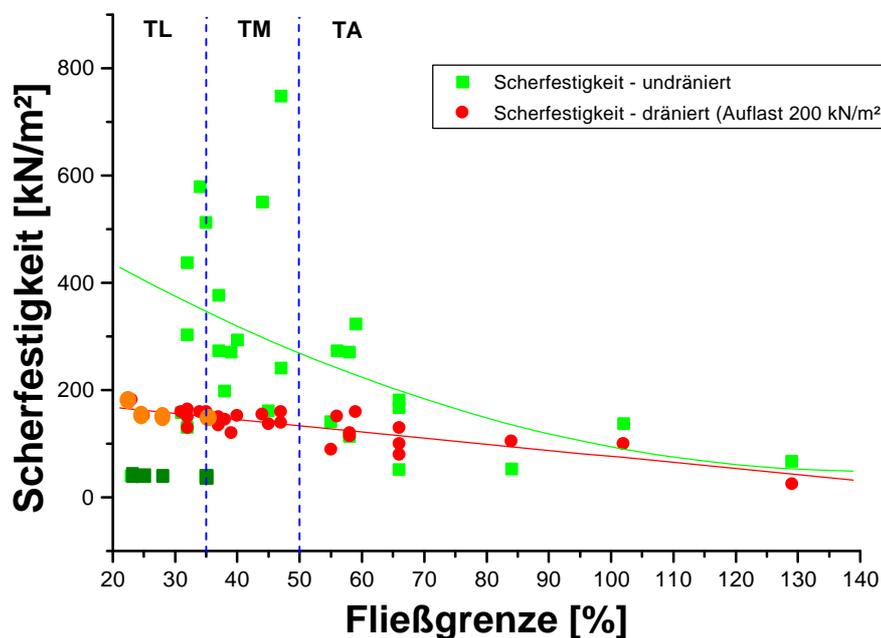


**Abb. 27** Auswirkungen der Plastizitätszahl auf die Festigkeit. Der blaue Pfeil kennzeichnet die Plastizitätszahl 20. Unterhalb dieser Grenze ist nach Angaben von KEIL das Verfahren nicht mehr anwendbar.

Abbildung 28 zeigt die Festigkeit, abhängig von der Fließgrenze und der Bodengruppe nach DIN 18196. Proben der Bodengruppen TL und TM erreichen die höchsten Festigkeitswerte.

Mit steigender Fließgrenze sinken die Festigkeitswerte. Das bedeutet Proben der Bodengruppe TA erreichen die niedrigsten Festigkeitswerte.

Um nachzuweisen, daß nicht allein ein niedriger Wassergehalt (Fließgrenze) für hohe Festigkeitswerte verantwortlich ist, werden in Abb. 28 die Bodenproben mit sehr niedriger Fließgrenze (Löß, grobe Schluffe, bindige Sande) farblich von den übrigen Proben getrennt (oliv für die undränierete Scherfestigkeit; orange für die dränierete Scherfestigkeit). Die Grafik zeigt, daß sich diese Proben, trotz niedriger Wassergehalte an der Fließgrenze, nur schlecht verfestigen lassen.



**Abb. 28** Auswirkungen der Fließgrenze auf die Festigkeit. TL, TM, TA sind die Kurzzeichen nach DIN 18196 für leichtplastische, mittelplastische und ausgeprägt plastische Tone.

### **5.2.5 Schlußfolgerungen aus den durchgeführten Verfestigungsversuchen**

Abschließend können folgende Faktoren für die erfolgreiche Anwendung von Wasserglas-Soda-Gemischen aufgeführt werden:

1. Der Tongehalt soll mindestens 11 % betragen (Abb. 21)
2. Der optimale Bereich für die Plastizitätszahl liegt zwischen 10 und 40 Gew.-% (Abb. 27)
3. Der optimale Bereich für die Fließgrenze liegt zwischen 30 und 65 Gew.-% (Abb.28)
4. Das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis soll  $\geq 1$  sein (Abb. 24 und 25)
5. Hohe Kaolinitgehalte wirken sich negativ auf die Verfestigungseigenschaften aus (Abb. 26)

Dabei ist zu berücksichtigen, daß es sich nicht um absolute Kriterien handelt. Aufschluß darüber, ob das Verfahren anwendbar ist, kann nur eine Einzeluntersuchung geben.

### **5.3 Klassifizierungen der Böden nach ihrer Eignung für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen**

Die folgenden Kapitel sollen eine Übersicht zur Eignung der untersuchten 30 bindigen Böden für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen geben.

Es lassen sich folgende Gruppen unterscheiden:

#### **5.3.1 Geeignete Böden zur Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen an der Fließgrenze**

*Leicht bis mittelplastische Tone mit hohem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis*

Leicht bis mittelplastische Tone mit hohem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis (vgl. Kapitel 5.2.3) liefern die besten Voraussetzungen für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen.

Bei Böden dieser Bodengruppen ist im unbehandelten Zustand an der Fließgrenze die dränierte Scherfestigkeit und der Reibungswinkel, ermittelt im Rahmenschergerät (vgl. 3.2.2), meistens nicht mehr meßbar ( $\varphi = 0$ ), da das Material zu fließfähig ist. Die Böden zeigen bei Zusatz der Chemikalien eine sehr rasche Anfangsverfestigung. Bereits nach einer Stunde ist schon ca. 75 % der Endfestigkeit erreicht. Nach 24 Stunden ist die Verfestigung abgeschlossen. Es werden hohe Scherfestigkeiten mit Reibungswinkeln zwischen 29 - 33 Grad erreicht. Die undränierte Scherfestigkeit, ermittelt über den Kegelfallversuch (vgl. Kapitel 3.2.1), ist im unverfestigten Bereich ca. 4 - 5 kN/m<sup>2</sup>. In verfestigtem Zustand liegen die Scherfestigkeiten je nach Bodenmaterial zwischen 198 - 750 kN/m<sup>2</sup>. Hierzu gehören die Proben 1,3,6,15, 16,18, 21, 22, 29, 30.

*Ausgeprägt plastische Tone und organische Tone mit hohem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis*

Ausgeprägt plastische Tone und organische Tone mit hohem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis lassen sich auch noch gut verfestigen. Anhand der Abbildungen 24 und 25 läßt sich die Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung nachweisen. Die Verfestigung diese Tone erreicht Werte, wie bei den leicht. bis mittelplastischen Tönen. Hierzu gehören die Proben 10, 22, 14 17, 25 und 23.

**Tabelle 22:** Einteilung der untersuchten Bodenproben\* in Gruppen der Verfestigungsfähigkeit (\* Kennzahlen nach der Verfestigung).

Scherfestigkeit- undrännert, Bereich [kN/m <sup>2</sup> ]	Scherfestigkeit- drännert, Bereich [kN/m <sup>2</sup> ]	Reibungs- winkel,Bereich [Grad]	Prob.-Nr.	Eigenschaften	Gruppe
198 - 749	145 - 160	≥ 29	1, 3, 6, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 29, 30, 10	Leicht- bis mittelplastisch, Probe 10 Ton mit org. Anteil	<b>gut</b>
162 - 324	137 - 150	26 - 28	14, 17, 25, 23	Mittel- bis ausgeprägt plastische Tone	<b>mittel</b>
167 - 255	115 - 130	20 - 25	2, 11, 12, 28, 26	Ausgeprägt plastische Tone	<b>mäßig</b>
52 - 182	80 - 100	< 20	5, 7, 8, 9, 24	Ausgeprägt plastische Tone	<b>schlecht</b>
40 - 42	153 - 183	33 - 40	4, 13, 19, 27	Verfahren nicht anwendbar	<b>schlecht</b>

Die Überschneidungen bei der undrÄnirten Scherfestigkeit in Tabelle 22, Spalte 1 zwischen den einzelnen Gruppen zeigen, daÙ nur die Summe der bodenmechanischen und röntgenologischen Untersuchungen AufschluÙ darüber gibt, ob eine Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen erfolgversprechend sein kann.

**Tabelle 23:** Kennzeichnende Eigenschaften der Verfestigungsklassen bindiger Böden.

Klasse	Bodengruppe nach DIN 18196	Tongehalt	Plastizitätszahl	Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis
Leicht verfestigbar	TL, TM, TA, OT	≥11 % < 50%	≥ 10 ≤ 23	≥ 1
Mittel verfestigbar	TA	≥ 11 % < 50%	> 23 ≤ 36	< 1
Mäßig verfestigbar	TA, OT	> 50 %	≥ 36	< 1
Nicht verfestigbar	TL,UL	< 10 %	< 10	-

Die Tabelle 23 gibt Anhaltspunkte, welche Eigenschaften der untersuchten Bodenproben auf die Anwendbarkeit der Bodenverfestigung mit Wasserglas und Soda schließen lassen. Dabei ist besonders beim Tongehalt zu berücksichtigen, daÙ nicht unbedingt die Menge sondern die Zusammensetzung des Tonanteils für die Verfestigung bedeutend ist. Bei den vorliegenden Untersuchungen ergibt sich zwar, daÙ bei den Proben mit hohen Tongehalten (> 50 %) eine schlechtere Verfestigung eintritt. Dies kann auf eine ungünstige mineralogische Zusammensetzung schließen lassen. GleichermaÙen besteht die Möglichkeit, daÙ ein Ton mit geeigneter Zusammensetzung und hohen Tongehalten sich sehr gut verfestigen läÙt. Dieser Fall ist auch bei den Tonen mit Tongehalten zwischen 10 und 50 % erkennbar. Bei dieser Gruppe gibt es sowohl Tone mit sehr guten Festigkeiten als auch einige Ausnahmen mit weniger guten Festigkeiten (Abb. 21).

### **5.3.2 Bedingt geeignete Böden zur Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen an der Fließgrenze**

*Ausgeprägt plastische Tone mit niedrigem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis*

Bei ausgeprägt plastischen Tönen mit niedrigem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis (vgl. Kapitel 5.2.3) tritt nach Zusatz von Chemikalien eine geringere Verfestigung ein, als bei den Böden von Kapitel 5.3.1. Je nach Grad der gewünschten Festigkeit ist ein Absenken des Wassergehaltes, abhängig von der Fließgrenze des Ausgangsmaterials, erforderlich. Für den Reibungswinkel ergeben sich Werte von 15 - 25 Grad. Die undrained Scherfestigkeit liegt zwischen 52 - 255 kN/m<sup>2</sup>. Hierzu gehören die Proben 2, 11, 28, 26 sowie die Proben 5, 7, 8, 9, die nur mäßige Festigkeitswerte erreichen.

*Organische Tone*

Organische Tone mit Ausnahme von Probe 10, die ein hohes Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis besitzt, reagieren sehr unterschiedlich auf den Zusatz von Chemikalien. Sie besitzen eine Fließgrenze  $w_L > 50\%$ ,  $I_p > 7\%$  und ihre Lage ist unterhalb der A-Linie im Plastizitätsdiagramm. Die Ergebnisse der Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen erreichen teilweise nur ungenügende Werte. Hierzu gehören die Proben 12 und 24.

### **5.3.3 Ungeeignete Böden zur Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen an der Fließgrenze**

Lößähnliche Böden, grobe Schluffe und bindige Sande mit geringen Tonanteilen (< 10 %, nach DIN 18196 mit UL und teilweise noch mit TL bezeichnet) lassen sich nicht verfestigen. In den untersuchten Böden dieser Art sind in nicht ausreichendem Maße reaktionsfähige Tonminerale vorhanden.

Der einzige Vorgang besteht darin, daß nach längerer Zeit das Wasserglas aushärtet, so daß eine spröde harte Masse entsteht. Die Reaktion beruht auf dem Vorgang der Aushärtung von Wasserglas bei Luftzutritt. Die hohen Reibungswinkel resultieren aus der Kornzusammensetzung und der Wasserglas-aushärtung. Hierzu gehören die Proben 4, 13, 19 und 27.

### **5.3.4 Eignungsprüfungen**

a) Voruntersuchung:

Die Voruntersuchung gibt Aufschluß, ob das zu untersuchende Bodenmaterial für eine Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen geeignet ist.

Folgende Versuche sind für die Voruntersuchung notwendig:

- Bestimmung der Kornverteilung nach DIN 18123
- Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze nach DIN 18122
- Röntgenologische Untersuchung und Bestimmung des Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnisses

b) Hauptuntersuchung:

Die Hauptuntersuchung gibt Aufschluß über die erreichbaren Festigkeiten nach Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen.

Folgende Versuche sind für die Hauptuntersuchung notwendig:

- Bestimmung der Scherfestigkeit nach DIN 18137
- Bestimmung des Kegelwiderstandes

Abhängig vom Verwendungszweck des behandelten Bodenmaterials können weitere Versuche notwendig sein:

Bestimmung der erreichbaren Proktordichte nach DIN 18127 des mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelten Bodenmaterials.

Bestimmung der Durchlässigkeit nach DIN 18130 des mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelten Bodenmaterials.

Felduntersuchungen bezüglich der Tragfähigkeit des Bodenmaterials mittels Dichteprüfungen, Lastplattendruckversuchen sind zu empfehlen.

Untersuchung der Verarbeitbarkeit des behandelten Materials:

Es soll untersucht werden, wie schnell sich das behandelte Material bei dem jeweiligen Wassergehalt verfestigt, um zum Beispiel zu verhindern, daß das Material bei Trommelbodenfräsen die Trommel zusetzt und ein weiteres Fräsen erschwert. Der Wassergehalt kann für eine langsamere Aushärtung erhöht oder für eine schnellere Aushärtung erniedrigt werden.

Für den Nachweis der Eignung zur Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen sind immer bodenmechanische und röntgenologische Untersuchung des zu verfestigenden Materials erforderlich. Weiterführende Felduntersuchungen bezüglich der Tragfähigkeit des Bodenmaterials sind mittels Dichteprüfungen, Lastplattendruckversuchen und Proctorversuchen durchzuführen.

### **5.3.5 Qualitätsanforderungen an zu verfestigende Böden**

Die erfolgreiche Anwendung des Hydratonverfahrens in mehreren Ländern (vgl. Kapitel 6.2) zeigt, daß KEIL eine interessante Lösung für das Verfestigen von Tonen und tonhaltigen Böden gefunden hat. Die eingangs genannten Falschanwendungen, die das Verfahren in Verruf brachten, beruhen nach Aussagen KEIL's auf der Verwendung ungeeigneten Bodenmaterials. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen diese Aussage und liefern Ergänzungen für die erfolgreiche Eignungsprüfung von Böden auf Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen.

#### *Anwendungskriterien nach KEIL:*

Nach den Angaben von KEIL muß ein Ton folgende Kriterien erfüllen, damit das Hydratonverfahren angewendet werden kann:

1. KEIL (1958): *Nach dem Patent DWP 2929 muß stets echter, hydrationsfähiger Ton in genügendem Umfange verwendet werden.* Hydratation ist nach KEIL die physikalisch-chemische Wechselwirkung durch Ionenaustausch einwertiger Ionen.

2. In einem Manuskript der Fakultät für Verkehrsbauwesen vom 04.09.1958 legt KEIL zur Falschanwendung des Hydratonverfahrens, infolge ungeeigneten Bodenmaterials, im Wendehafenbecken StalinStadt fest: *"Nach dem Patent DWP 2929 muß stets ein echter, hydratationsfähiger Ton in genügendem Umfange verwendet werden. Da bei der Besichtigung dieses "Tonvorkommens" (nach KEIL ein ungeeignetes Schluffmaterial) diese verschiedenen Qualitäten festgestellt werden, legte der Verfasser in einem Protokoll vom Mai 1953 die zur Sicherung dieser, nach dem patentierten Verfahren einzuhaltenden Bedingung und geltenden Güteziffer von **mindestens 20 Plastizität** fest und beschrieb das Verfahren der laufenden Gütekontrolle:*

***Es sind nur hydratationsfähige Mineralien mit einer möglichst hohen Fließgrenze verwendungsfähig.** Es genügt, die Fließgrenze des Tones und die Ausrollgrenze als obere Grenze der Plastizität zu bestimmen, damit den Grad der Plastizität. Es genügen ferner kurze Teste mit dem Enslingerät. **Wenn daher ein natürlicher Ton stark plastisch ist, ist seine Eignung erwiesen.***

3. In seinem Buch mit dem Titel Geotechnik legt KEIL (1959) fest: *Je höher die natürliche Hydratationskraft des echten Tones mit einer **Mindestfließgrenze von 40** ist, die sich an der Fließgrenze der Grenze zwischen Hydratations- und Schwerkraft unzweideutig zu erkennen gibt, ist, um so geringer der Tonzusatz.*

4. In der Zeitschrift für angewandte Geologie Heft 11 legt KEIL (1960) fest: *Ein tauglicher echter Ton weist eine **Plastizitätsziffer von 30** bzw. eine **Fließgrenze von 60 %** auf.*

#### *Anwendungskriterien nach HÖLZER:*

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen folgende Ergänzungen der Forschungsergebnisse KEIL's zu. Wie in Abbildung 21 und 27 dargelegt, kann der Anwendungsbereich bei bestimmten Bodengruppen erweitert werden und muß bei anderen eingeschränkt werden. Neben den Untersuchungen zur Plastizität sind röntgenologische Untersuchungen zum Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis erforderlich.

#### **Ad 1./4.:**

In Abb. 27 markiert der blaue Pfeil die Plastizitätszahl 20. Im Bereich  $< 20$  soll nach KEIL das Hydratonverfahren nicht mehr anwendbar sein. Die vorliegenden Ergebnisse zur Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Plastizitätszahl zeigen, daß auch Böden mit einer Plastizitätszahl  $\geq 10$  und  $\leq 20$  für die Anwendung des Verfahrens geeignet sind.

#### **Ad 2./4.:**

In Abbildung 21 (Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Bodengruppe) ist zu erkennen, daß ausgeprägt plastische (früher stark plastische) Tone mit einem Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $< 1$  für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen weniger geeignet sind. Bei der Gegenüberstellung der Fließgrenze mit der Scherfestigkeit und der Plastizitätszahl mit der Scherfestigkeit ergibt sich, daß bei steigender Fließgrenze und steigender Plastizitätszahl die Scherfestigkeit sinkt. Zudem bestätigen die unterschiedlich hohen Festigkeiten bei Proben der gleichen Bodengruppe, daß die Bestimmung der Fließgrenze und der Ausrollgrenze allein, kein eindeutiger Hinweis auf die Anwendbarkeit des Hydratonverfahrens ist. Der röntgenologische Nachweis, daß das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis  $\geq 1$  ist, ist zu führen (Abb. 24 und 25), um die Eignung für das Hydratonverfahrens bestätigen zu können.

### **Ad 3.:**

In Abbildung 27 (Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Fließgrenze) ist zu sehen, daß die Mindestfließgrenze nicht bei 40 % sondern darunter liegt. Auch bei kleineren Wassergehalten (Fließgrenzen) können hohe Scherfestigkeiten erzielt werden.

#### *Ergebnisse STRIEGLER's zur Verwendung des Boden-Chemikal-Gemischs als Zuschlagstoff zur Bodenverfestigung:*

STRIEGLER (1963) beschreibt eine Möglichkeit Böden mit ähnlicher Zusammensetzung wie die Proben 4, 13, 29, 27 zu verfestigen. STRIEGLER verwendet geeignete Ton-Chemikalien-Gemische zur Bodenverbesserung von Kies, Sand, Löß, Lößlehm nach dem Hydraton-Verfahren als toneinsparende Füllstoffe (Grundstoffe). Dem unbrauchbaren Bodenmaterial kann ein bestimmter Prozentanteil Tonmehl zugesetzt werden. Anschließend kann das Bodengemisch mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt werden. STRIEGLER untersuchte den Einfluß der verschiedenartigen Grundstoffe Kies, Sand, Löß und Lößlehm auf die erzielbare Stabilität der Chemikalmischung. STRIEGLER vergleicht die bodenphysikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften von z. B. Sand-Ton-Chemikaliengemischen mit denen des reinen Ton-Chemikaliengemisches. Es werden Zusammenhänge zwischen dem unterschiedlichen Wasseraufnahmevermögen der Grundstoffe und damit verbundener Auswirkungen auf die erreichbare Stabilität des Boden-Chemikalgemischs aufgeführt.

## 6. Mögliche Anwendungen des Hydratonverfahrens

Die folgenden Kapitel erläutern die Möglichkeiten, die sich durch die Anwendung des untersuchten Verfestigungsverfahrens bieten. Teilweise werden die Anwendungsmöglichkeiten schon in den 50er Jahren in der ehemaligen DDR realisiert, worauf in Kapitel 6.2 hingewiesen wird.

### 6.1 Anwendungssituationen

Anwendungen sind denkbar beim:

a) Stabilisieren von Böschungen und Dämmen

Aufgeweichtes Böschungs- und Dammbaumaterial könnte vor Ort durch Mischen mit Wasserglas-Soda-Gemischen wieder verfestigt werden.

Für den Bau von Böschungen und Dämmen angeliefertes Bodenmaterial, das einen zu hohen Wassergehalt besitzt, könnte verfestigt und für das Bauvorhaben als geeignet betrachtet werden .

b) Stabilisieren von aufgeweichten, unbefestigten Straßen (in der Literatur oft als Erdstraßen bezeichnet)

Aufgeweichte Wege können durch Mischen des Bodenmaterials mit Wasserglas-Soda-Gemischen innerhalb kurzer Zeit wieder befahrbar gemacht werden.

c) Immobilisieren von Rutschungen

Abrutschendes Erdreich kann durch Einmischen von Wasserglas-Soda-Gemischen verfestigt werden.

Die durchzuführenden Arbeiten zur Anwendung der Bodenverfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen werden in Kapitel 6.3 (Applikation der Zusätze) erläutert.

## **6.2 Historische Anwendungen**

Nach KEIL (1959) wird das Verfahren erfolgreich bei folgenden Bauvorhaben angewandt (bei einigen Bauvorhaben werden von KEIL keine Jahreszahlen genannt):

1. *als Dichtungsteppich an der Talsperre Cranzahl/Sa., 1950/51*
2. *als Dichtungsbelag des neuen Geiselbettes 1952/53*
3. *als Dichtung des Hochwasserrückhaltebeckens bei Staußfurt-Gebesee*
4. *als vorherrschendes Dichtungsorgan an der wasserseitigen Böschung des Erdstaudammes "Kalte Bode" im Harz, 1955*
5. *als zusätzliches Dichtungsmittel an der "kalten Bode", 1957*
6. *als Dichtungsteppich an der 2. Fahrt zwischen Lüdinghausen und Senden des Dortmund-Emskanals, 1953/54*
7. *als Dichtungsorgans eines Reiterfangedammes in Oberbayern*
8. *als Dichtung für einen Hochwasserdamm bei Karlsruhe*
9. *als Dichtung für einen Hochwasserdamm am Rhein*
10. *zur Dichtung des Hochwasserrückhaltebeckens Spraitbach, 1958*
11. *zur Dichtung eines Dammes bei Vilshofen, 1958*
12. *zur Dichtung des Hochwasserrückhaltebeckens Hüttenbühl, 1959*
13. *zur Dichtung größerer Becken in Rom (Italien), 1959*
14. *zur Dichtung eines Tunnels in Österreich, 1959*

Die Beispiele zeigen, daß das Verfahren mit Erfolg angewandt wurde. Das Verfahren geriet nach KEIL wegen Fehlanwendungen und ungenügender Sorgfalt bei der Auswahl des Bodenmaterials in Verruf.

### **6.3 Applikation der Zusätze (Umsetzung der Laborexperimente in Feldversuche)**

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse der Laborversuche den Feldversuchen entsprechen. Genaue Auskunft darüber kann nur ein Großversuch mit abschließender Überprüfung der erreichten Festigkeit und Tragfähigkeit geben. Dabei spielen die Qualität der eingesetzten Arbeitskräfte und Maschinen eine wesentliche Rolle. Daher kann zu diesem Punkt nur folgendes gesagt werden. Je besser die Feldarbeiten in Bezug auf die folgenden Kriterien durchgeführt werden, desto mehr entsprechen die Ergebnisse der Feldarbeiten den Laborexperimenten.

- a) Im Voraus muß die Versorgungssituation mit den benötigten Chemikalien geklärt werden.
  
- b) Anhand der zu verfestigenden Erdmassen ist die Menge der benötigten Chemikalien zu errechnen.
  
- c) Geeignete Maschinen und Arbeitskräfte müssen geordert werden. Ein gleichmäßiges und gutes Vermischen der Chemikalien mit den zu verfestigenden Bodenschichten muß garantiert werden.

d) Durchführung der Feldarbeiten:

Die Arbeiten zur Bodenverfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen werden vor Ort durchgeführt. Bis zu einer Tiefe von ca. 70 cm können Bodenschichten durch Bearbeiten mit Trommelbodenfräsen verfestigt werden. Natriumkarbonat wird über die Oberfläche (mittels Druckluft) gleichmäßig verspritzt. Wasserglas kann in der Fräse, die in der Regel mit einem Wasserbehälter und einem Schlauchanschluß versehen ist, transportiert werden. Die Zufuhr des Wasserglases erfolgt während den Fräsarbeiten. Die Arbeiten können auch händisch durchgeführt werden. Bei größeren Tiefen im Bereich von 2,0-4,0 m können Schlitzfräsen eingesetzt werden, um Bodenverfestigungen durchzuführen.

## **6.4 Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Anwendung und Instandhaltung**

Für die Durchführung von Bodenverfestigungen mit Wasserglas-Soda-Gemischen fallen bestimmte Aufgaben bei der Anwendung und Instandhaltung an, die für eine dauerhafte Haltbarkeit der Bodenverfestigung notwendig sind. Dabei sind neben den Materialeignungsprüfungen auch die Verarbeitbarkeit des Materials, die lokalen Gegebenheiten und die klimatischen Verhältnisse beim Einbau zu berücksichtigen.

Die Anwendung und Instandhaltung von Projekten der Bodenverfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen erfordert folgende Qualitätssicherungsmaßnahmen:

a) Bezüglich Austrocknung:

Das Material verhält sich gegenüber Austrocknung wie ein ganz normaler Boden, d.h. das Material kann schrumpfen und Risse bilden. Daher sollen Maßnahmen zum Schutze der Oberfläche, mit dem Ziel einer dauerhaften Standsicherheit erfolgen. Dabei können die üblichen Methoden zum Schutz von Dammbauwerken oder Deponiebauten herangezogen werden.

b) Bezüglich Wasserzulauf:

Das Material muß während der Behandlung mit Wasserglas-Soda-Gemischen vor Wasserzulauf geschützt werden. Nach der Aushärtung und der Herstellung einer glatten Oberfläche ist das Material relativ unempfindlich. Ein Schutz der Oberfläche vor Aufweichung und Ausschlämmung ist dennoch sinnvoll, da das Material sich im wesentlichen wie eine glatte und feste Tonoberfläche gegenüber zulaufendem Wasser verhält.

c) Bezüglich Erschütterung und Beanspruchungen bei der Aushärtung:

Das Material zeigt sich während der Aushärtung unempfindlich gegenüber Beanspruchungen (Erschütterungen, gestörter Probeneinbau beim Ermitteln der Rahmenscherfestigkeit). Ein Grund dafür ist die relativ schnelle Aushärtung während der ersten 30 Minuten.

## 6.5 Ökologische Aspekte

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Behandlung von Böden mit Chemikalien ist die Frage der Umweltverträglichkeit. Alle bestehenden Methoden, Böden mit Chemikalien zu verbessern, beeinträchtigen in gewissem Maße die Umwelt (SOKOLOVICH, 1988; DARIMONT et al. 1984). Im innerstädtischen Bereich sind Baumaßnahmen unter Zuhilfenahme von Chemikalien eine kaum wegzudenkende Technologie (BORCHERT et al., 1983). Dabei ist zu berücksichtigen, in welchem Milieu sich das Material befindet (z. B. wassergesättigt oder nicht wassergesättigt). Bei Arbeiten im Grundwasser ist z. B. eine Veränderung der Qualität dieses Wassers kaum auszuschließen (BÖHME, 1996). Erste systematische Untersuchungen zu diesem Thema werden von MÜLLER-KIRCHBAUER et al. (1982) durchgeführt.

Möglichkeiten, die Beeinflussung des Grundwassers bei Chemikalieninjektionen mit Weichgelen oder Hartgelen zu minimieren, sind nach BORCHERT et al. (1983):

1. Grundwasserhaltung (Sichern des Bauvorhabens gegen Wasserzulauf) während des Verpressvorgangs (oder Mischvorgangs) und der Aushärtungszeit
2. Abpumpen des Grundwassers aus dem Kontaktbereich des Injektionskörpers während und nach den Verpressarbeiten. Dabei ist es nicht erforderlich, den Verpresskörper vollständig freizupumpen.
3. Ummantelung des erforderlichen Injektionskörpers mit einem anderen Material, welches eine geringere oder gar keine Beeinflussung hervorruft.

4. Geeignete Abstimmung des Verpressprogramms auf die vorhandenen Verhältnisse des Projektes.
5. Wahl des geeignetsten Reaktives (Chemikalie) und Mischungsverhältnisses in Abstimmung auf die Randbedingungen.

Diese Möglichkeiten können, falls notwendig, auch für Bodenverfestigungen durch Wasserglas-Soda-Gemische eingesetzt werden. Dabei ist von Vorteil, daß mit sehr gering durchlässigen Tonen gearbeitet wird (CZURDA, 1987) und daß die Chemikalien sehr gut in die Tonstruktur eingebunden sind. Auf Gefahren bei Anwendung der chemischen Bodenverfestigung und den eventuell daraus entstehenden Folgen für die Umwelt (Kontamination von Luft, Wasser und Boden) durch toxische Verbindungen, wie z. B. Chrom-Lignin, Formaldehyd- und Phenolformaldehyd-Verbindungen, weist SOKOLOVICH (1988) hin. Verbindungen aus Soda und Silikatgelen werden von SOKOLOVICH als ungefährlich eingestuft.

Für die Weichgele liegt vom Hygiene - Institut Gelsenkirchen ein Gutachten auf mögliche Schadwirkungen vor. Vom Ergebnis her konnte dabei festgestellt werden, daß von der Rohstoffzusammensetzung und vom Weichgel selbst keine Gefährdung hervorgeht (BÖHME, 1996).

Im Deponiebereich ist der Einfluß von Säuren oder Basen auf die verwendeten Chemikalien bzw. die verfestigten Bodenbereiche zu untersuchen.

Dabei ist besonders zu berücksichtigen, daß für Geotextilien (auch Geokunststoffe: Aus synthetischen Fasern hergestellte, wasserdurchlässige Vliesstoffe, Gewebe oder Verbundstoffe werden zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Standfestigkeit sowie bei Entwässerungsaufgaben eingesetzt, PRINZ, 1997) durch alkalisches Bodenmaterial oder alkalische Lösungen Gefahren entstehen können (MARTIN & DACHROTH, 1994).

Betrachtet man die verwendeten Verbindungen und die Art ihrer Einbindung, so ist von einem geringen Gefährdungspotential auszugehen. Natrium und Silizium sind die wesentlichen Bestandteile der hier angesprochenen Zusätze und auch die Hauptbestandteile der Böden. Soda zum Beispiel entsteht auch in der freien Natur, ist aber in der Lage, durch seine alkalische Wirkung und den erhöhten Salzgehalt das osmotische Potential des Bodenwassers zu erhöhen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1989).

Sehr positive Aspekte sind die hohe Festigkeit, die Immobilisierung von Schwermineral - Kontaminaten infolge von pH - Erhöhung und die Beständigkeit der Silikatverbindungen. Zwar können durch basische Lösungen auch Schwerminerale wie z. B. Chrom und Aluminium freigesetzt werden, diese werden jedoch durch Tone als natürliche Barriere für Schwermetalle zurückgehalten (CZURDA, 1987). Zudem wird das Hydratonverfahren ausschließlich bei sehr geringdurchlässigen Böden eingesetzt, so daß die Gefahr für eine Beeinträchtigung des Grundwassers gering ist.

Modellversuche im Gelände und Langzeitstudien sind anzustreben.

## 7. Zusammenfassung

Aufbauend auf den Forschungen von KEIL und STRIEGLER werden mit Hilfe von Wasserglas-Soda-Gemischen dreißig bindige Lockergesteine auf die Möglichkeit der Bodenverfestigung untersucht.

Dazu werden folgende bodenmechanische Kennwerte bestimmt:

Kornverteilung, Wassergehalt, Konsistenzgrenzen, Kegelwiderstand, Scherfestigkeit. Außerdem wird die röntgendiffraktometrische Mineralzusammensetzung ermittelt

Die Untersuchungen werden nach folgendem Schema durchgeführt:

### 1. Qualitative Ansprache der Bodenprobe

Qualitative Merkmale zu den Verfestigungseigenschaften können

- a) bodenmechanisch über die Bestimmung der Konsistenzgrenzen und die Einordnung der Bodengruppe im Plastizitätsdiagramm
- b) röntgenographisch über das Illit/Kaolinit [001]-Basisreflexverhältnis bestimmt werden.

### 2. Verfestigungsversuche

- a) Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Verfestigung
- b) Auswirkungen der Fließgrenze auf die Verfestigung
- c) Auswirkungen der Plastizitätszahl auf die Verfestigung
- d) Auswirkungen der Aktivitätszahl auf die Verfestigung
- e) Auswirkungen des Tongehaltes auf die Verfestigung
- f) Auswirkungen der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Bodengruppe nach DIN 18196 auf die Verfestigung

- g) Bestimmung der optimalen Zumischung der Chemikalien
- h) Auswirkungen des Illit/Kaolinit [001]-Basisreflexverhältnis auf die Verfestigung

### 3. Prüfungen der Festigkeit des behandelten Materials

- a) Bestimmung des Kegelwiderstandes
- b) Bestimmung der dränierten Scherfestigkeit und des Winkels der inneren Reibung

Dabei wird deutlich, daß leicht bis mittelplastische Tone und ausgeprägt plastische Tone (Tonanteil > 11 %) mit einem hohen Illitanteil die besten Ergebnisse für die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen an der Fließgrenze liefern.

Ausgeprägt plastische Tone mit geringem Illitgehalt erreichen nur ungenügende Festigkeitswerte. Prüfungen bezüglich der Verfestigung von ausgeprägt plastischen Tonen mit geringem Illitanteil ergaben, daß eine Verringerung des Wassergehaltes zu ähnlich guten Ergebnissen wie bei leicht plastischen Tonen führt. Für grobe Schluffe, Löß und bindige Sande ist das Hydratonverfahren nicht anwendbar.

Die Untersuchungen in Bezug auf den optimalen Zusatz von Wasserglas und Soda an der Fließgrenze ergaben, daß 15 % Wasserglas mit 2 - 4 % Natriumkarbonat optimal sind. Eine Materialabhängigkeit des optimalen Chemikalzusatzes kann nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse von Analysen mit dem Röntgendiffraktometer ergeben, daß eine Abhängigkeit der Verfestigung vom Illit/Kaolinit - Verhältnis der Proben besteht. Proben, die im Verhältnis zu Kaolinit sehr viel Illit enthalten, lassen sich ausgezeichnet verfestigen.

Zusammenfassend sind folgende Faktoren, bezogen auf die Ergebnisse dieser Arbeit, für die erfolgreiche Anwendung von Wasserglas - Soda Gemischen entscheidend:

1. Der Tongehalt soll mindestens 11 % betragen
2. Der optimale Bereich für die Plastizitätszahl der unbehandelten Bodenproben liegt zwischen 10 und 40 Gew.-%
3. Der optimale Bereich für die Fließgrenze der unbehandelten Bodenproben liegt zwischen 30 und 65 Gew.-%
4. Das Illit/Kaolinit [001] - Basisreflexverhältnis soll  $\geq 1$  sein
5. Der optimale Wasserglaszusatz liegt bei 15 %, der optimale Sodazusatz bei 2-4 %
6. Hohe Kaolinitanteile wirken sich negativ auf die Verfestigung mit Wasserglas-Soda-Gemischen aus

Es ist zu berücksichtigen, daß es sich bei den obengenannten Punkten nicht um absolute Kriterien handelt. Aufschluß darüber, ob das Verfahren anwendbar ist, kann nur durch eine Eignungsprüfung entschieden werden.

Die Frage, welche Ionenaustauschvorgänge für die Verfestigung verantwortlich sind, konnte in der vorliegenden Arbeit nicht geklärt werden. Hierzu sind spezielle Untersuchungen notwendig.



## 8. Literaturverzeichnis

### A Bücher, Publikationen

BÖHME, M. (1996): Auswirkungen von Baugruben mit Weichgel- oder Betonsohlen auf die Grundwasserqualität, Baumaßnahmen im Grundwasser, Baurecht und Bautechnik, Band 7, S. 83-93; Erich Schmidt Verlag, Berlin.

CARROLL, DOROTHY (1970): Clay minerals, a guide to their x-ray identification; Geological Soc. of America, Boulder, Colorado.

CZURDA, K. (1987): Ton als geologische Barriere. - Sonderdruck aus: Symposium Deponiebauwerke Frankfurt 1987, S. 137-154.

DARIMONT, BAROWSKI, MILDE, OETTING (1984): Grundwasserbeeinflussung durch chemische Bodeninjektionen auf der Basis von Natriumaluminat-Weichgelen, gwf-wasser/abwasser Heft 125, S. 608; Oldenbourg Verlag, München.

FAHN, R. & BUCKL, H. (1968): The Industrial Uses of Bentonite. - Reprint from INTERCERAM No. 2/1968, S. 1-5; Verlag Schmid, Freiburg.

HÜBNER, A. & SUß, G.(1975): Untersuchungen über die Verfestigung eines Bodens mit Chemikalien. Straßen und Tiefbau 29, S. 10-17; Bertelsmann, Gütersloh.

JÄNKE, S. (1958): Über die bautechnischen Eigenschaften und die baupraktische Bewährung des Hydratons. Bauplanung-Bautechnik H. 9, S. 389-392; H. 11, S.484-505; Heft 18, S.439-443; Verlag für Bauwesen, Berlin.

JASMUND K. & LAGALY G. (1993): Tonminerale und Tone, 490 S.; Steinkopf Verlag, Darmstadt.

HURLEY, C.H. & THORNBURN, T.H. (1972): Sodium silicate stabilisation of soils: A review of the literature.-Highway Research Record Heft 381, S. 46-49; Illinois.

KARSTEDT, J. (1996): Nutzungsmöglichkeiten natürlicher Mergelschichten oder Weichgele als Baugrubensohlenabdichtung, Baurecht und Bautechnik, Band 7, S. 65-81; Erich Schmidt Verlag, Berlin.

KEIL, K. (1950/53): Verfahren zum Abdichten und Versteifen von Bodenarten wie Lehm, Ton u.ä.. - Patentschrift Nr. DWP 2929, S. 1-3. Amt für Erfindungs- und Patentwesen der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin.

KEIL, K. (1959): Amtliche neue Feststellungen zur Frage der Anwendung und Bewährung des Hydratonverfahrens für die Dichtungsaufgaben im Wasserbau.- Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen Dresden, 6(1958/59), Heft 2, S. 355-373, Dresden.

KEIL, K. (1959): Geotechnik.-3. Aufl., 1456 S.; Knapp -Verlag, Halle/Saale.

KEIL, K. (1960): Tatsachen zur Frage der Anwendung von Hydraton im Wasserbau.-Zeitschrift für angewandte Geologie, Heft 11, S. 568-570; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhaltung, Stuttgart.

KEIL, K. (1957): Neuere Untersuchungsergebnisse am Hydratonverfahren. Wiss. Zeitschr. d. Hochschule für Verkehrswesen, Band 5, Heft 1, S. 63-77, Dresden.

KEIL, K. (1958/59): Amtliche neue Feststellungen zur Frage der Anwendung und Bewährung des Hydratonverfahrens für die Dichtungsaufgaben im Wasserbau. Wiss. Zeitschr. d. Hochschule für Verkehrswesen, Band 6 Heft 2, S. 355-373, Dresden.

KEIL, K. (1959): Das Hydratonverfahren in der Erprobung und Bewährung. Die Wasserwirtschaft, Heft 5, S.114-122; Verlag Franckh, Stuttgart.

KEIL, K. (1959): Praktische Beispiele für die Anwendung des Hydraton-Dichtungsverfahrens im Wasserbau. Die Bautechnik Band 36 Heft 3, S.100-106; Verlag Ernst, Berlin.

KIRSCH, K. (1982): Abdichtung mittels Injektionen. Herstellung von Dichtungssohlen für Baugruben. - Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, S. 257-282; Bertelsmann, Gütersloh.

KLENGEL, J. K., WAGENBREDT, O. (1989): Ingenieurgeologie für Bauingenieure, 3. Auflage, 216 S.; Verlag für Bauwesen, Berlin.

KÖHLER, R. (1957): Gedanken zur Frage der Anwendung von Hydraton im Talsperrenbau.- Zeitschrift für angewandte Geologie, Heft 7, S. 323-327; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhaltung, Stuttgart.

KRISCHNER, H., KOPELHUBER-BITSCHNAU, B. (1994): Röntgenstrukturanalyse und Rietveldmethode, 194 S.; Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden.

LAGALY, G., MÜLLER-VONMOOS, M., FAHN, R. (1981): Vorgänge bei der Sodaaktivierung von Bentoniten am Beispiel eines Bentonits von Neuseeland, Keramische Zeitschrift, 33. Jahrgang, Nr. 5, S. 278-283; Verlag Schmid, Freiburg.

LAGALY, G. (1988): Grundzüge des Rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineraldispersionen. In: MÜLLER-VONMOOS, M. et al.: Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Heft 133, S. 7-22; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

LANG, H.J. & HUDER, J. (1994): Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Böden und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, 3.Auflage, 252 S., Springer, Berlin.

LEUSSINK, H., VISWESWARAYA, T.G. & BRENDLIN, H. (1964): Beitrag zur Kenntnis bodenphysikalischer Eigenschaften von Mischböden.-Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau TH Karlsruhe, 15, Karlsruhe.

LATSCHA, H.P. & KLEIN, H.A. (1978): Anorganische Chemie, 424 S.. Springer, Heidelberg.

MADSEN, F. T. (1988): Das Quellverhalten der Tone. In: Müller-Vonmoos, M. et al.: Tonmineralogie und Bodenmechanik Heft Nr. 133, S. 39-50. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

MARTIN, P. & DACHROTH, W. (1994): Alkalische Böden und die Messung ihres pH-Wertes. -TIS- Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau, S. 41-42, Bertelsmann, Gütersloh.

MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., Borchert, K.-M., FRIEDRICH, W., GEISLER, E., AURAND, K., MILDE, G., BAROWSKI, M., OETTING, R., DONEL, M. (1982): Grundwasserbeeinflussung durch Silicatgelinjektionen, Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der TU, Heft 11, Berlin.

MÜLLER-VONMOOS, M., LØKEN, T. (1988): Das Scherverhalten der Tone. In: Müller-Vonmoos, M. et al.: Tonmineralogie und Bodenmechanik, Nr. 133, S. 23-37. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

MÜLLER-VONMOOS, M. (1988): Tonmineralogie und Bodenmechanik, Nr. 133, S. 1-5. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

MÜLLER, L. (1987): Spezielle geologische und geotechnische Untersuchungen bei der Sanierung von Rutschungen im nördlichen Siebengebirge. - Mitt. Ing. - u. Hydrogeol., H. 27, 234 S. ; Aachen.

MUHS, H. (1980): Erkennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels zur Bodenklassifizierung. - Grundbautaschenbuch, Teil 1, 3. Auflage; Ernst & Sohn, Berlin.

PRINZ, H. (1997): Abriß der Ingenieurgeologie 3. erw. Auflage, 546 S., Enke, Stuttgart.

RIEDEL, C. M. (1952): Chemical Solidification in Construction and Emergencies, Massachusetts Institute of Technology, Proceedings of the Conference on Soil Stabilization 1952, S. 68-81, Cambridge/Mass..

ROGNER, J. (1983): Untersuchungen zum Einfluß der Neutralisation und des Siliciumanteils auf das Spannungs-Verformungsverhalten eines chemisch verfestigten Korngerüstes, Diplomarbeit am Grundbauinstitut der TU Berlin.

SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde, 591 S., Enke, Stuttgart.

SCHETELIG, K., KLIESCH, K., PETERS, F. (1987): Untersuchungen zum Gefüge und zum Einfluss mineralogischer und chemischer Faktoren auf den Quelldruck überkonsolidierter Tone von Frankfurt/Main, Ber. 6. Nat. Tag. Ing.-Geol, S. 125-134, Aachen.

SCHULTZE, E./ MUHS, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, 722 S., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

SKEMPTON, A. W. (1953): The colloidal „activity" of clays. Proc. Intern. 3. Conf. Soil Mechanics, Aug.1953, 1, S. 57-61; Zürich

SOKOLOVICH, V. E. (1988): Chemikal Soil Stabilization and the Environment, Soil Mechanics and Foundation Engineering 24 (6), 233-235; Consultants bureau NY, New York.

SOMMER, F. (1983): Untersuchungen zum Einfluß der Neutralisation und des Siliziumanteils auf das Umströmungswasser bei einem chemisch verfestigten Korngerüst, Diplomarbeit am Grundbauinstitut der TU Berlin.

SOOS, P.v. (1980): Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. - In: Grundbautaschenbuch, Teil 1, 3. Auflage: S. 59-116; Ernst & Sohn, Berlin.

STEIN, D. & GERDES, K. (1988): Injektionsverfahren als Vorausmaßnahme für den Tunnelvortrieb bei partiell schwierigem Gebirgsverhalten. - Tunnel 13-23; Bertelsmann, Gütersloh.

STEIN, D., MAIDL, B. & GERDES, K. (1990): Einflüsse auf die Beschaffenheit des Grundwassers bei der Lockergesteinsinjektion mit Polyurethan- und Organomineralharzen. - Taschenbuch für den Tunnelbau 1990, S. 73-91; Glückauf Vlg., Essen.

STRIEGLER, W. (1963): Die Stabilitätsgrundlagen des Hydratons, 175 S. Freiburger Forschungshefte C 137 Geologie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

## **B Technische Vorschriften, Richtlinien, Normen, Merkblätter**

DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. ; Beuth Verlag, Berlin:

- DIN 4021 T1: Baugrund; Erkundung durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben; Aufschlüsse im Boden (07.1971).
- DIN 18 121 T1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Wassergehalt; Bestimmung durch Ofentrocknung (04.1976)
- DIN 18 122 T1: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen); Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze (04.1976).
- DIN 18 123: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korngrößenverteilung (04.1983).
- DIN 18 124 T1: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpyknometer (03.1973).
- DIN 18 125 T1: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Dichte des Bodens ; Laborversuche (04.1972).
- DIN 18 127: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Proctorversuch (04.1976).
- DIN 18 137 T1: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Scherfestigkeit; Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen (03.1972).
- DIN 18 196: Erdbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen (06.1970).

## **C Merkblätter und Richtlinien der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen betr. Erd- und Grundbau sowie Mineralstoffe im Straßenbau:**

- Merkblatt für die Bodenverfestigung mit Zement
- Merkblatt für die Bodenverfestigung mit Kalken
- Merkblatt für die Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit bituminösen Bindemitteln

Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB), Einzelblätter:

- B 11.1: Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit Zement (1986).
- B 11.4: Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigungen mit hochhydraulischem Kalk (1977).
- B 11.5: Eignungsprüfungen bei Bodenverbesserung mit Feinkalk und Kalkhydrat (1991).

## **9. Anhang**

### **Untersuchungen der Einzelproben**



## Bodenprobe 1: Roter Ton aus Haiterbach

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt von der Halde der Firma Trost GmbH (Firmensitz in Rauenberg) in Wiesloch. Der ursprüngliche Herkunftsort ist, nach Aussagen der Angestellten, Haiterbach/Südbaden. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton und Schluff, schwach sandig.

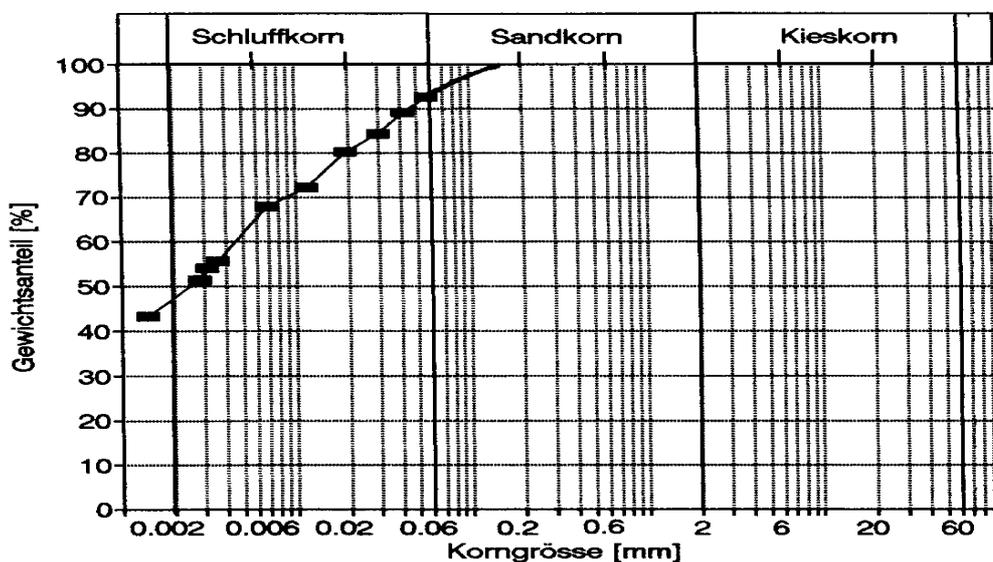


Abb. 1.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 1.

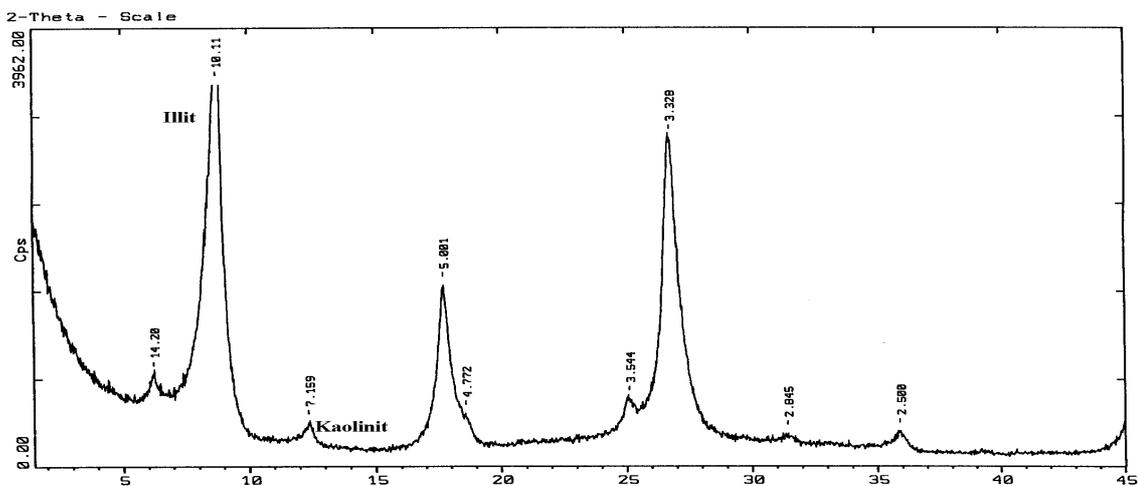


Abb. 1.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 1 (mittelplastischer Ton). Der [001] - Basisreflex von Illit ist höher als der von Kaolinit.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt sich um einen roten, mittelplastischen Ton mit einem Tongehalt von 47 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 47 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Das Bodenprobenmaterial wird durch Zusatz von Natriumkarbonat verflüssigt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 4 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 384 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 749 kN/m<sup>2</sup>.

Dieser Wert ist zu hoch, da durch die rasche Verfestigung die geforderte minimale Eindringtiefe von 4 mm unterschritten wurde. Die Gewichtslast des Kegels lag bei 1 kg. Der Winkel der inneren Reibung beträgt in verfestigtem Zustand 32 Grad an der Fließgrenze ( $w_L = 47\%$ ).

**Tabelle 1:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 1.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,5</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>24</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>47</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>33</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>53</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>85/115/150/180</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>4 (an Fließgrenze)</b>	<b>749</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>47</b>	
<b>[001]-Basisreflex Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>24,5</b>	

## Bodenprobe 2: Grün-gelber Ton aus Malsch

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt von der Halde der Firma Trost GmbH (Firmensitz in Rauenberg) in Wiesloch. Der ursprüngliche Herkunftsort ist, nach Aussagen der Angestellten, Malsch/Nordbaden. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton, schwach schluffig und sandig.

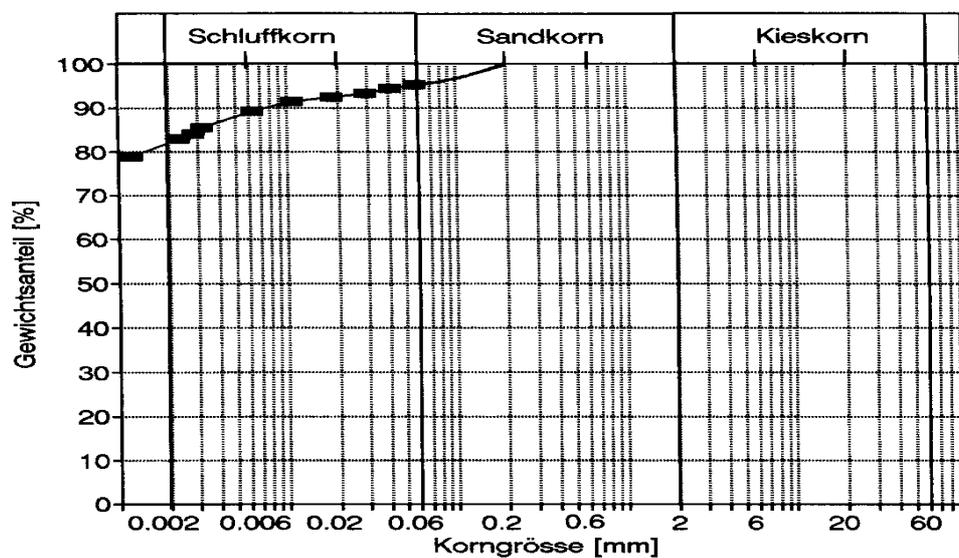


Abb. 2.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 2.

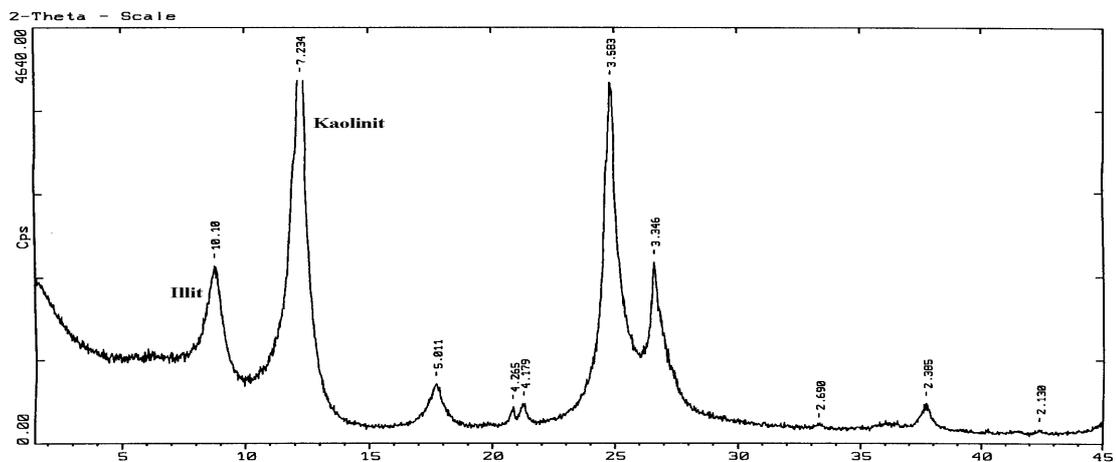


Abb. 2.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 2 (ausgeprägt plastischer Ton). Der [001]-Basisreflex von Illit ist niedriger als von Kaolinit.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grün - gelben ausgeprägt plastischem Ton mit einem Tongehalt von 82 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Konsistenz der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 84 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 87 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 105 kN/m<sup>2</sup>. Der Winkel der inneren Reibung beträgt in verfestigtem Zustand 20 Grad bei der Konsistenz der Fließgrenze ( $w_L = 84\%$ ). Obwohl es sich bei der Bodenprobe um einen ausgeprägt plastischen Ton handelt, konnte die Festigkeit verbessert werden.

**Tabelle 2:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 2.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,63</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>51</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>32</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>84</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>20</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>31</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>50/68/80/105</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>105</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>82</b>	
<b>[001]-Basisreflex Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>0,3</b>	

### Bodenprobe 3: Grauer, verwitterter Tonstein aus Hilsbach

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt von der Lokalität "Am Eichelberg" bei Hilsbach/Nordbaden. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Keuper zuzuordnen.

Bodenart:

Stark verwitterter Tonstein. Aufgrund der Kornverteilung (Abb. 3.1) würde es sich um einen schluffigen, tonigen schwach kiesigen Sand handeln.

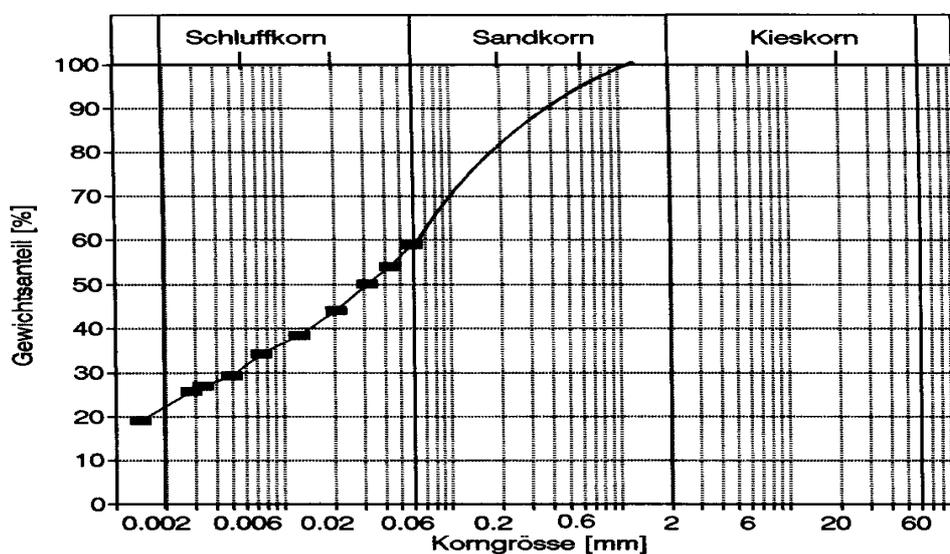


Abb. 3.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 3.

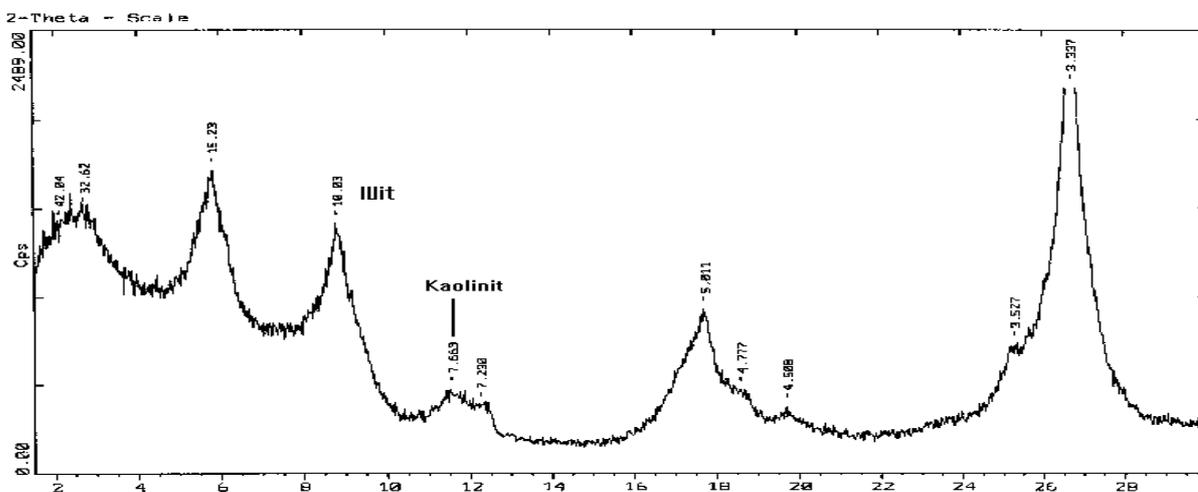


Abb. 3.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 3 (mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen leicht plastischen Ton mit einem Tongehalt von 22 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 35 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Bei Zusatz von Natriumkarbonat versteift sich das Bodenmaterial. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 5 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 203 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 513 kN/m<sup>2</sup>. Bei dem Bodenprobenmaterial erfolgte die Verfestigung nach Chemikalzusatz so rasch, daß nach 24 Stunden die Minimaleindringtiefe von mind. 4 mm unterschritten wurde. Daher ist der Wert von 513 kN/m<sup>2</sup> für die undränierete Scherfestigkeit als überhöht anzusehen. Eine genauere Überprüfung war nicht möglich, da, bei Auflage aller Zusatzgewichte (ca. 1400 g Auflast) die Eindringung immer noch zu niedrig war. Ein Auflegen weiterer Gewichte war durch den Versuchsaufbau nicht möglich. Der Winkel der inneren Reibung lag in behandeltem Zustand bei 32 Grad. Bei Zusatz von Soda verfestigte sich das Gemisch.

**Tabelle 3:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 3.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,59</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>13</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>22</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>35</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>32</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>35</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>65/100/130/160</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>5 (an Fließgrenze)</b>	<b>513</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>22</b>	
<b>[001]-Basisreflex Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>5,5</b>	

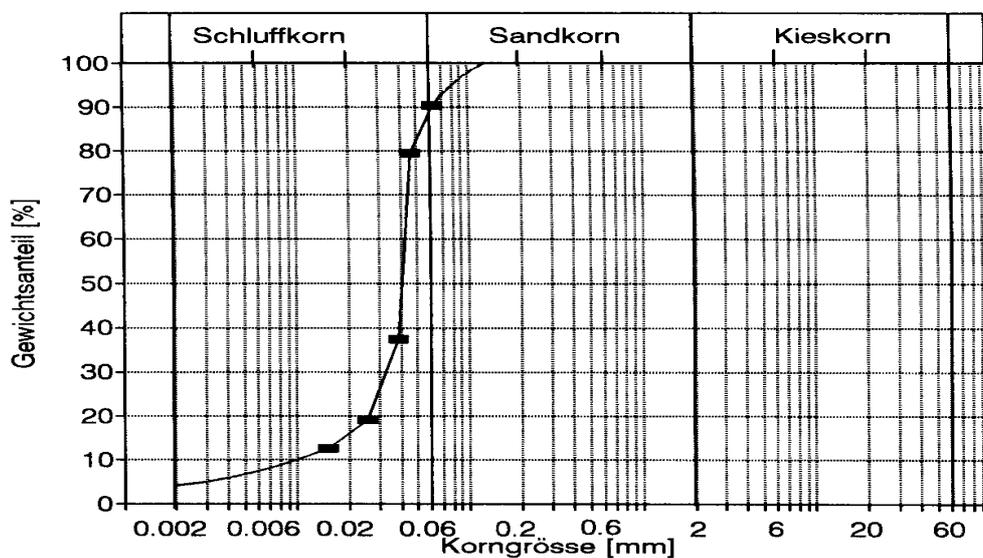
## Bodenprobe 4: Gelber Löss aus Bruchsal

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt von der Lokalität "Schneckenbronner Hof" südöstlich von Bruchsal/Nordbaden. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, schwach sandig und tonig.



**Abb. 4.1** Kornverteilungskurve der Bodenprobe 4.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen leicht plastischen Schluff mit einem Tongehalt von 5 %. Es gehört zur Bodengruppe UL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 23 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undrainede Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 1 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 10 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrainede Scherfestigkeit 40 kN/m<sup>2</sup>.

Das Bodenprobenmaterial ließ sich nur sehr schlecht verfestigen. Das Wasserglas härtete nach 24 Stunden aus, so daß die gesamte Bodenprobe eine glasig glänzende Oberfläche bekam. Bei Bodenproben dieser Art ist es schwierig, die Zustandsgrenzen zu bestimmen, da sie im Bereich bindiger Sande liegen. Der hohe Winkel der inneren Reibung von 40 Grad in behandeltem Zustand ist einzig durch die Aushärtung des Wasserglases an der Luft und das stabile Korngefüge von Löß bedingt.

**Tabelle 4:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 4.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>20,3</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>4</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>18</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>32</b>	<b>40</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>28</b>	<b>14</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>60/90/113/155</b>	<b>55/100/135/183</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>1 (an Fließgrenze)</b>	<b>40</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>5</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>nicht bestimmt</b>	

## Bodenprobe 5: Grauer, technisch veredelter Ton

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial heißt Compactonit. Es handelt sich um einen für geotechnische Zwecke industriell hergestellten Ton der Firma Marx aus Ruppach-Goldhausen.

Bodenart:

Ton, schluffig.

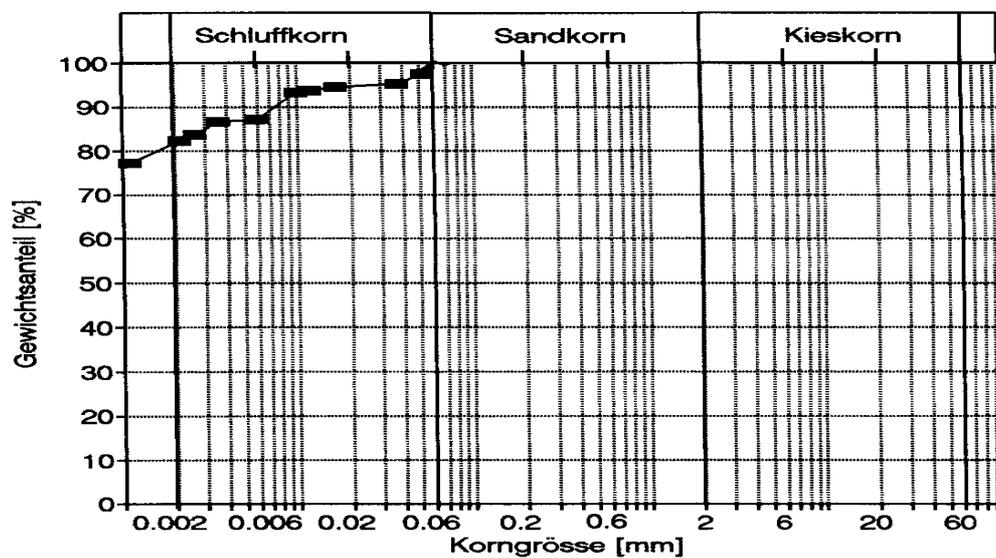


Abb. 5.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 5.

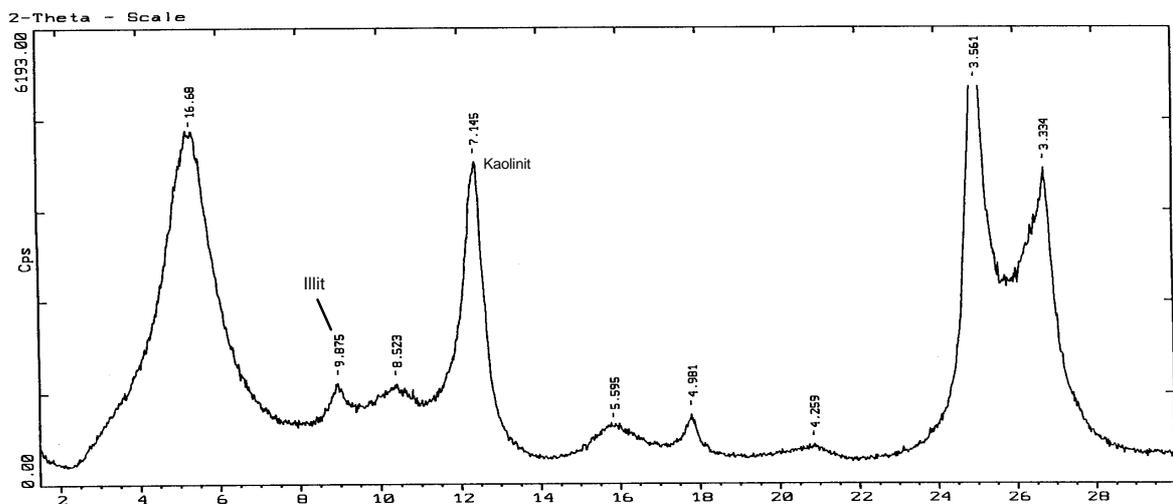


Abb. 5.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 5 (mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grauen, ausgeprägt plastischen Ton mit einem Tongehalt von 82 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196 .

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 102 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Die undrainede Scherfestigkeit steigt innerhalb von 15 Minuten von < 1 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 10 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrainede Scherfestigkeit 124 kN/m<sup>2</sup>.

Der Winkel der inneren Reibung beträgt 9 Grad. Genügende Festigkeit ließ sich nur durch ein Herabsetzen des Wassergehaltes auf 60 % erreichen.

**Tabelle 5:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 5.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,89</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>72</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>31</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>102</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>9</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>34</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>40/53/60/65</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>&lt; 1 (Fließgrenze)</b>	<b>124</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>82</b>	
<b>[001]-Basisreflex Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>0,1</b>	

## Bodenprobe 6: Grauer Ton aus der Umgebung von Heddesheim

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial wurde bei einem Bohrvorhaben der Firma GWK in Heddesheim/Südhessen entnommen. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär, dem oberen Zwischenhorizont zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig, schwach sandig.

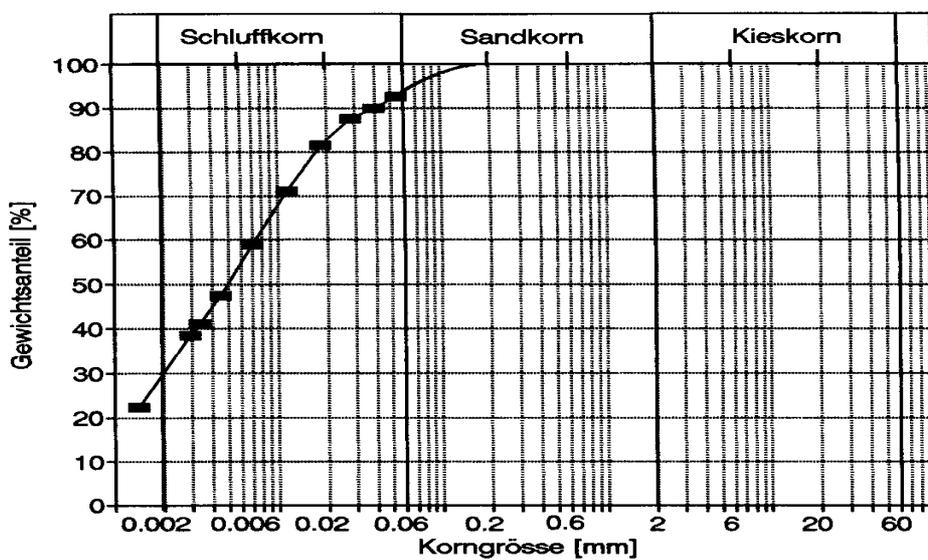


Abb. 6.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 6.

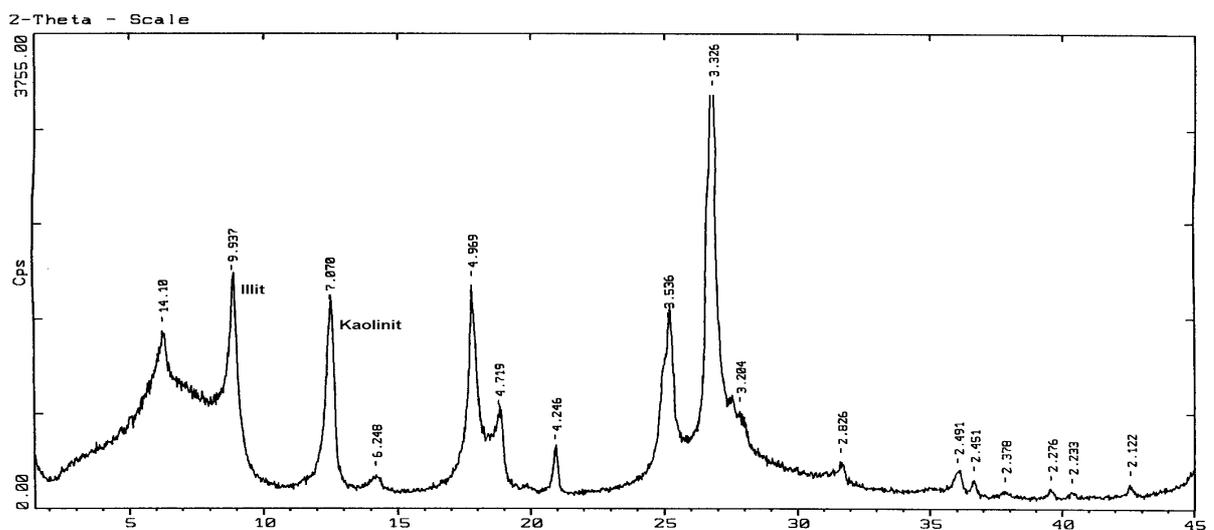


Abb. 6.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 6.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grauen mittelplastischen Ton mit einem Tongehalt von 30 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 44 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Das Bodenmaterial wird durch Zusatz von Natriumkarbonat verflüssigt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 303 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 551 kN/m<sup>2</sup>. Der Winkel der inneren Reibung des verfestigten Bodenprobenmaterials beträgt 34 Grad.

**Tabelle 6:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 6.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl</b>	<b>0,73</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>22</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>44</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>34</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>):</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>21</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>):</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>55/88/120/155</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>):</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>551</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>30</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>1</b>	

## Bodenprobe 7: Gelber Ton aus Eisenberg

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus den Tongruben der Firma Fuchs, Eisenberg/Südpfalz. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton, schwach schluffig, schwach sandig.

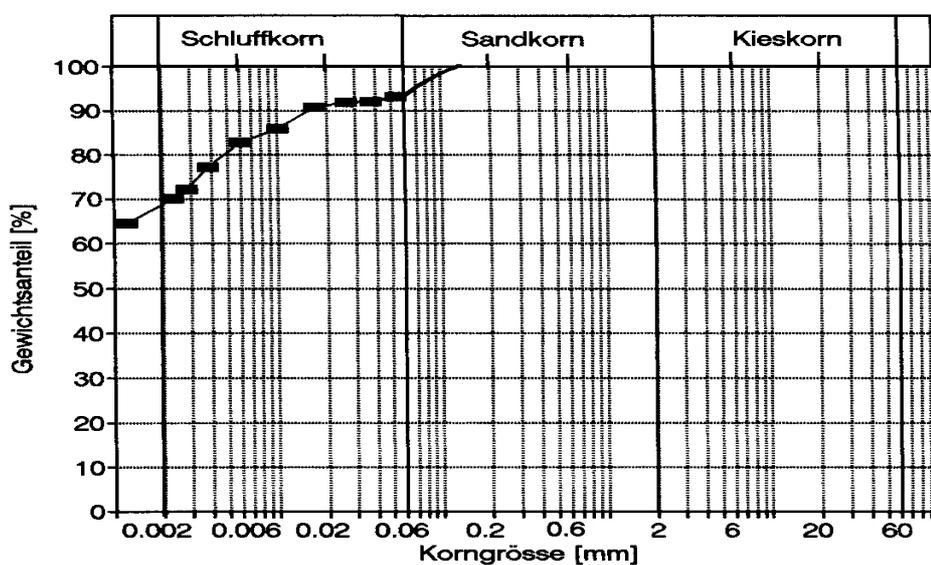


Abb. 7.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 7.

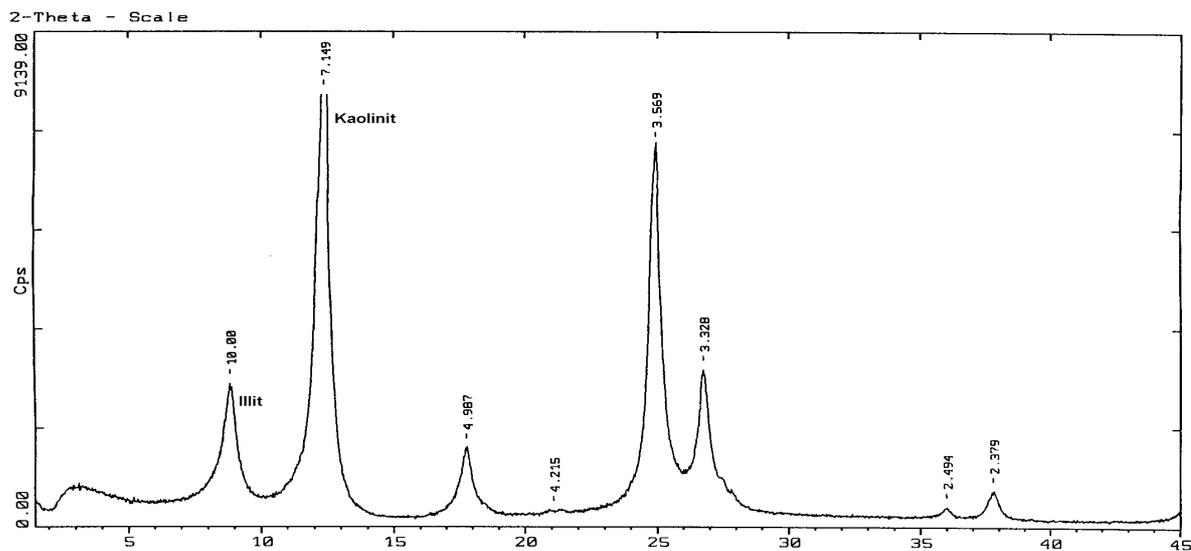


Abb. 7.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 7.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt sich um einen gelben ausgeprägt plastischen Ton mit einem Tongehalt von 68 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 55 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undrännierte Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 60 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrännierte Scherfestigkeit 141 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel liegt bei 17 Grad in stabilisiertem Zustand.

**Tabelle 7:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 7.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl</b>	<b>0,47</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>31</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>24</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>55</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>17</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>30</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>45/60/75/90</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>141</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>68</b>	
<b>[001]-Basisreflex Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>0,4</b>	

## Bodenprobe 8: Roter Ton aus Eisenberg

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus den Tongruben der Firma Fuchs, Eisenberg/Südpfalz. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton, schwach schluffig, schwach sandig.

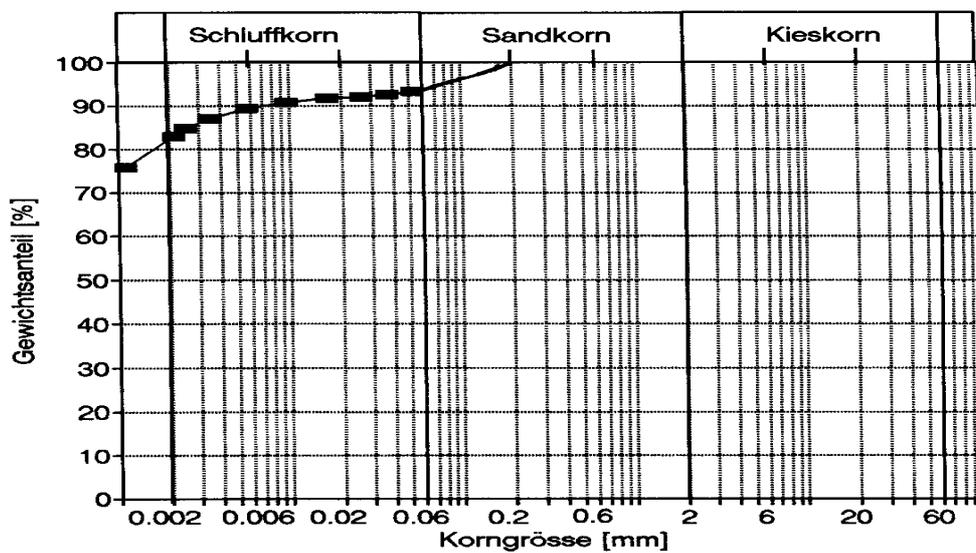


Abb. 8.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 8.

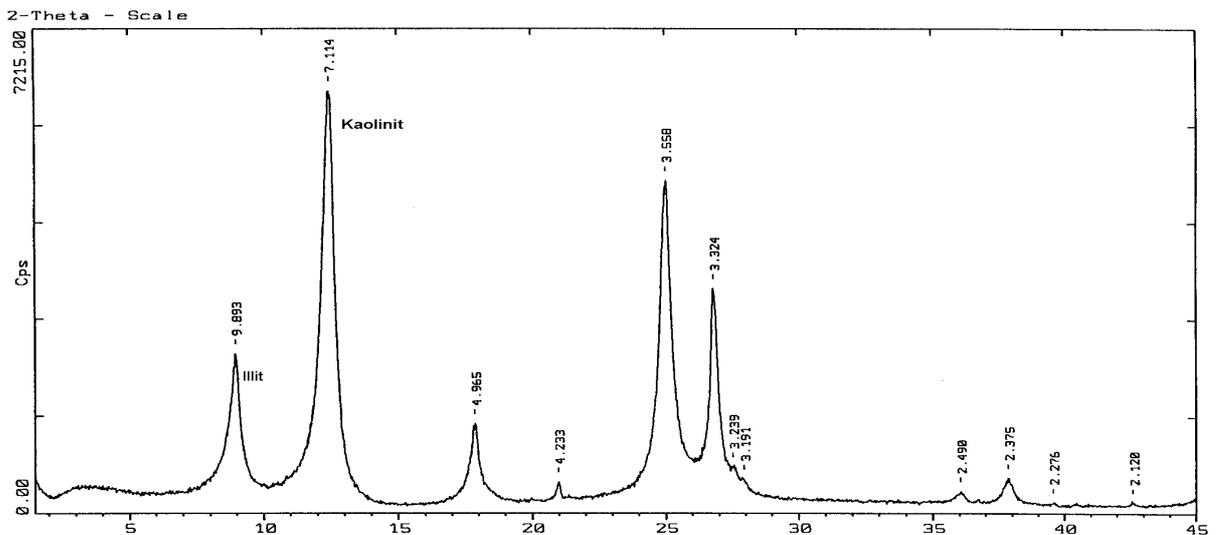


Abb. 8.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 8.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt sich um einen roten ausgeprägt plastischen Ton mit einem Tongehalt von 82 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 66 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 4 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 30 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 52 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel beträgt 16 Grad.

**Tabelle 8:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 8.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,51</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>42</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>24</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>66</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>16</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>25</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>40/50/70/80</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>4 (an Fließgrenze)</b>	<b>52</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>82</b>	
<b>[001]-Basisreflex Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>0,3</b>	

## Bodenprobe 9: Grauer Ton aus Eisenberg

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus den Tongruben der Firma Fuchs, Eisenberg/Südpfalz. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton, schwach schluffig und sandig.

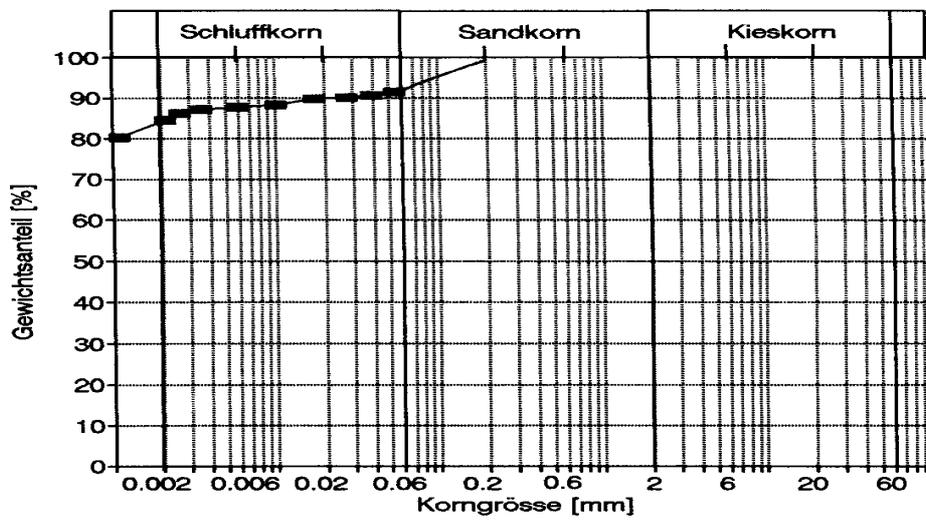


Abb. 9.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 9.

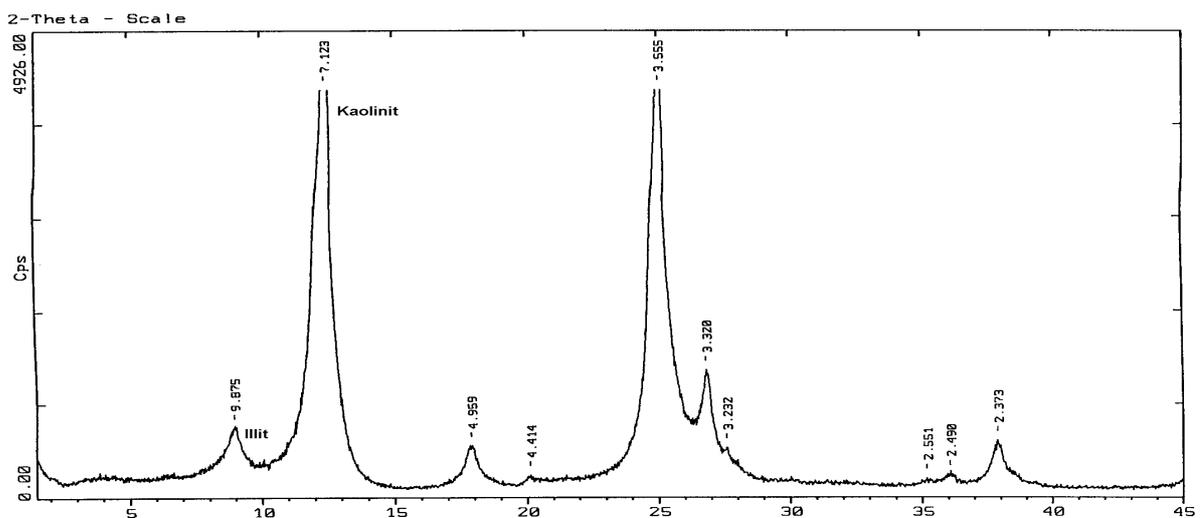


Abb. 9.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 9.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grauen ausgeprägt plastischen Ton mit einem Tongehalt von 84 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 66 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Das Bodenprobenmaterial wird durch Zusatz von Natriumkarbonat verflüssigt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undrained Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 147 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrained Scherfestigkeit 182 kN/m<sup>2</sup>.

**Tabelle 9:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 9.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,43</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>36</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>30</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>66</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>16</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>38</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>55/65/75/100</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>182</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>84</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit</b>	<b>0,1</b>	

## Bodenprobe 10: Grüner Ton aus Eisenberg

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus den Tongruben der Firma Fuchs, Eisenberg/Südpfalz. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton, schluffig, schwach sandig.

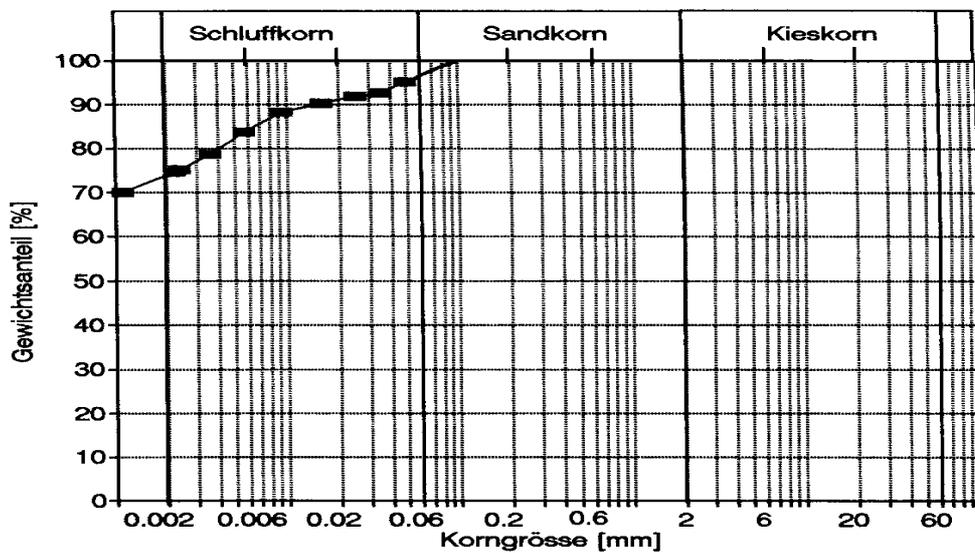


Abb. 10.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 10.

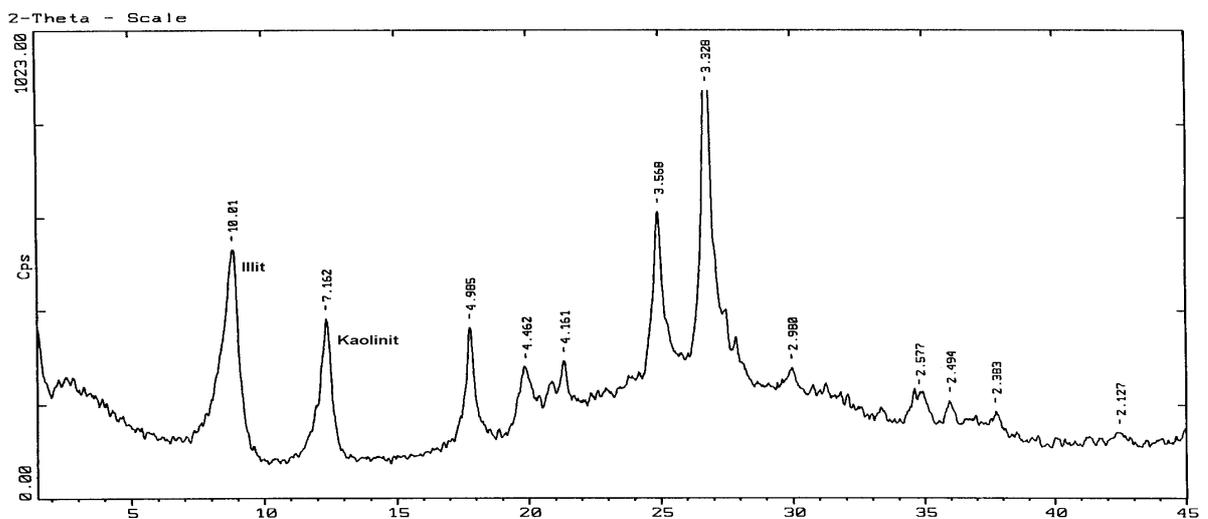


Abb. 10.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 10.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grünen leicht plastischen Ton mit einem Tongehalt von 74 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 56 % entspricht, mit Wasserglas und Soda behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Im Gegensatz zu den übrigen Bodenproben dieser Lokalität läßt sich die Bodenprobe 10 sehr gut verfestigen. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undrained Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 176 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrained Scherfestigkeit 275 kN/m<sup>2</sup>. Die Bodenprobe unterscheidet sich in der Bodengruppe und der mineralogischen Zusammensetzung von den übrigen Tonen dieser Lokalität. Die Mineralverteilung ist qualitativ bei allen hier untersuchten Tonen aus Eisenberg gleich. Quantitativ gesehen überwiegt bei Probe 10 Illit gegenüber Kaolinit. Der Winkel der inneren Reibung ist mit 31 Grad fast doppelt so groß, wie bei den anderen Proben aus Eisenberg.

**Tabelle 10:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 10.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl</b>	<b>0,34</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>24</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>32</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>56</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>31</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>31</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>65/85/120/153</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>275</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>74</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>1,5</b>	

## Bodenprobe 11: Grauer Ton aus Offenbach

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus Offenbach/Südhessen. Entnommen wurde das Material aus einer Baugrube an der Kreuzung von Leipziger- und Frankfurter-Straße. Das Bodenprobenmaterial wird als Rupelton bezeichnet. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, stark tonig.

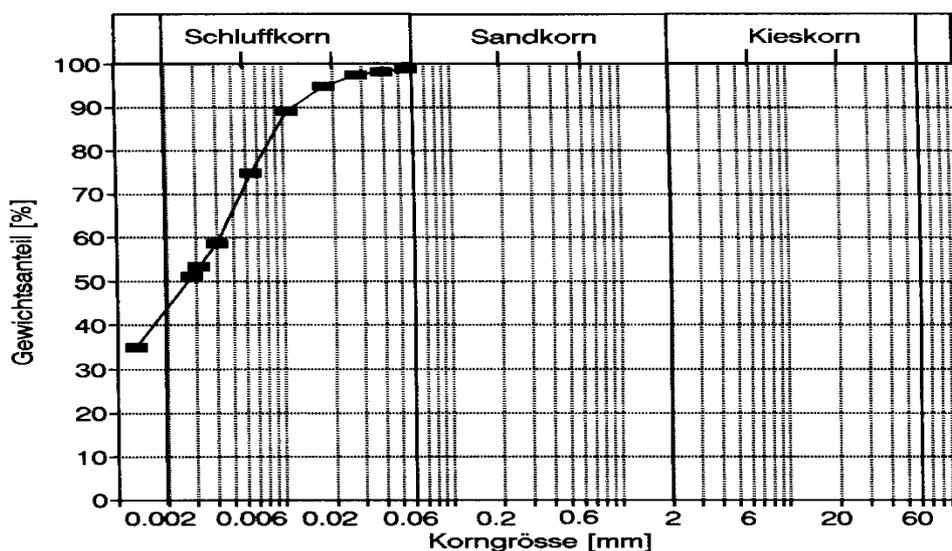


Abb. 11.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 11.

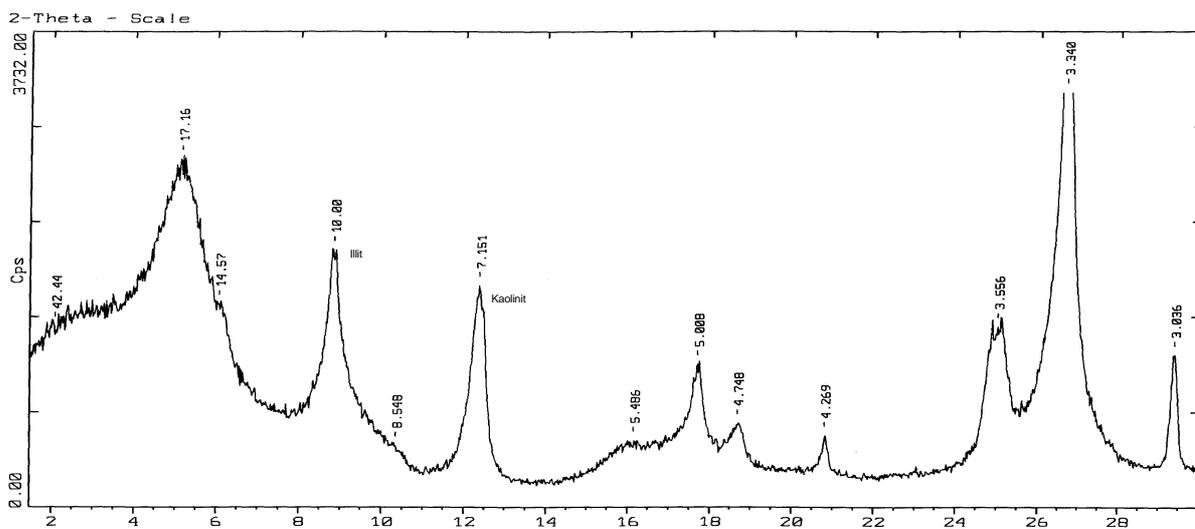


Abb. 11.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 11 (Mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenmaterial handelt es sich um einen grauen, ausgeprägt plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 43 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 58 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Das Bodenprobenmaterial wird durch Zusatz von Natriumkarbonat versteift. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 75 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 114 kN/m<sup>2</sup>. Das Bodenprobenmaterial läßt sich im Gegensatz zu den meisten ausgeprägt plastischen Tönen gut verfestigen. Der Tonmineralgehalt besteht im wesentlichen aus Montmorillonit (36%), Illit (39%), Chlorit (14%) und Kaolinit (10%) (nach SCHETTELIG, KLIESCH & PETERS, 1987).

**Tabelle 11:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 11.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,83</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>35</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>58</b>	
<b>Scherwinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>25</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>23</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>45/70/90/115</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>114</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>43</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>1</b>	

## Bodenprobe: 12 Braun-gelber Ton aus Frankfurt

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Baugrube am Autobahnkreuz Frankfurt/Südhessen. Die Entnahmetiefe beträgt 3,0-4,0 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig, schwach sandig.

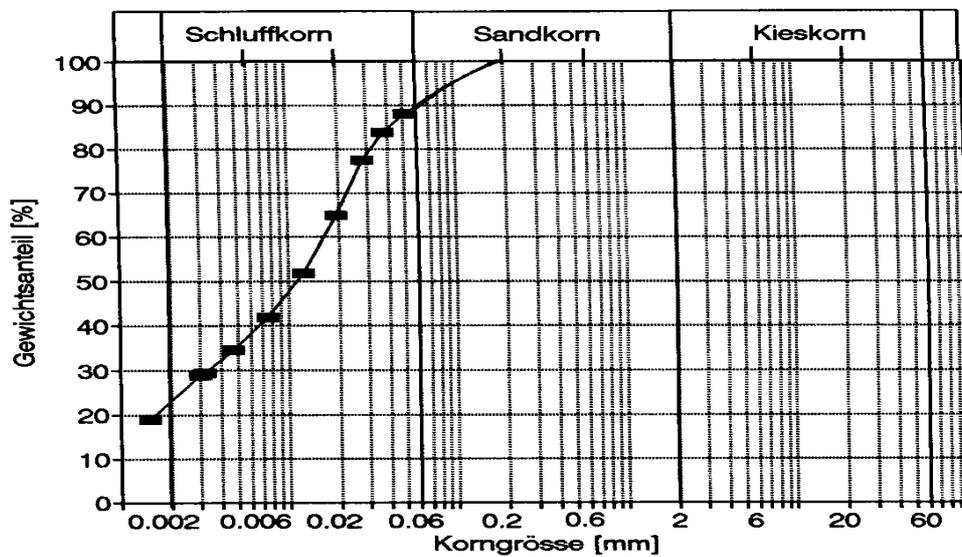


Abb. 12.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 12.

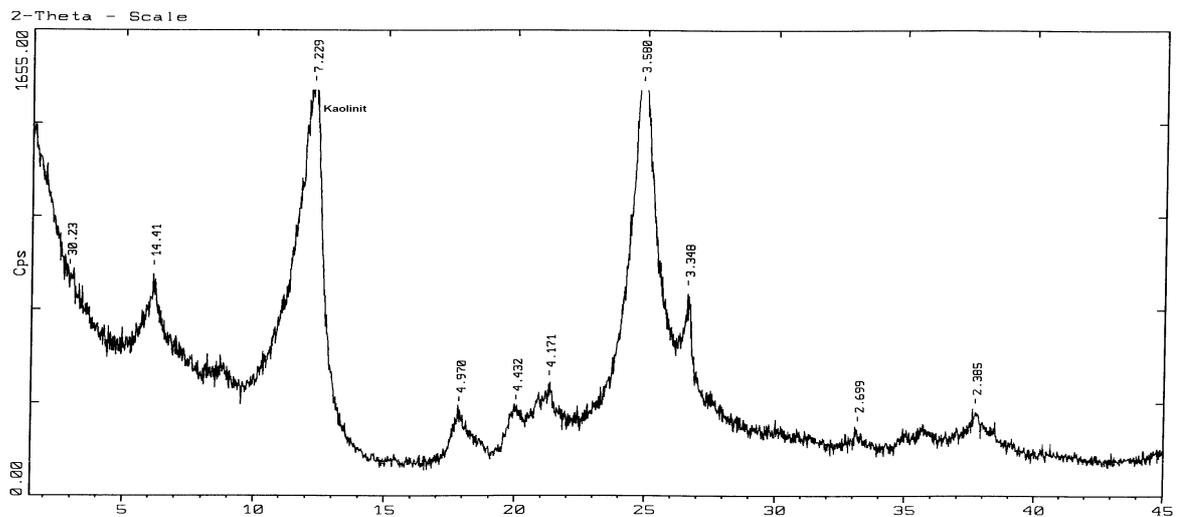


Abb. 12.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 12.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen braun-gelben Schluff mit organischen Beimengungen und einem Tongehalt von 22 %. Im Plastizitätsdiagramm liegt die Bodenprobe unterhalb der A-Linie. Es gehört zur Bodengruppe OT nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 66 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Das Bodenprobenmaterial wird durch Zusatz von Natriumkarbonat verflüssigt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 6 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 132 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 167 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel beträgt 20 Grad.

**Tabelle 12:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 12.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>1,38</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>30</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>35</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>66</b>	
<b>Scherwinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>20</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>42</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>50/80/95/130</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>6 (an Fließgrenze)</b>	<b>167</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>22</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>&lt; 0,1</b>	

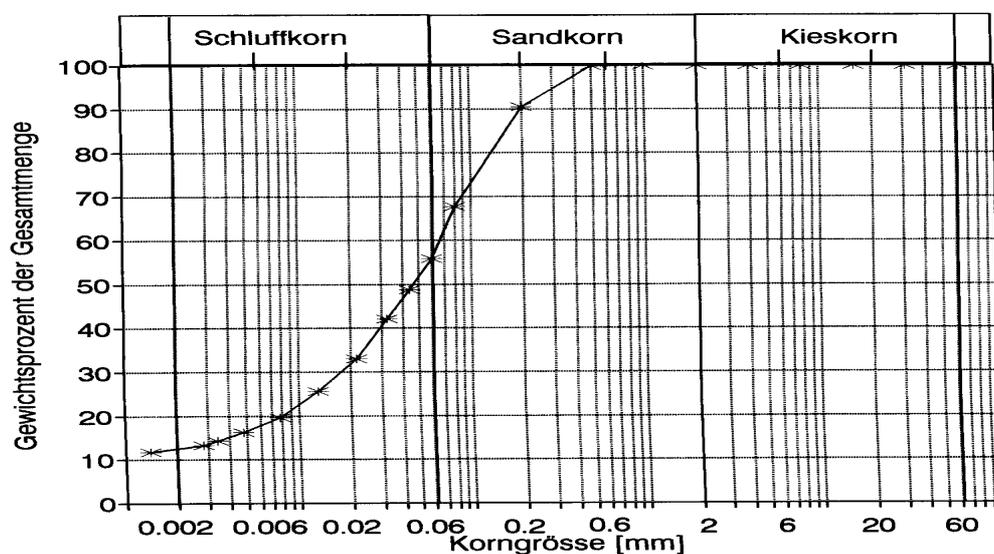
## Bodenprobe 13: Braunes Schluff-Sand-Gemisch aus Ladenburg

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Baugrube auf dem Gelände der Firma York in Ladenburg/Nordbaden aus einer Tiefe von 3,3 - 3,7 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Sand und Schluff, schwach tonig.



**Abb. 13.1** Kornverteilungskurve der Bodenprobe 13.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen braunen, leicht plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 12 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 25 % entspricht mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verfestigungsreaktion nach Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen im eigentlichen Sinn findet nicht statt. Die einzige Reaktion, die zu beobachten war, ist die Aushärtung des Wasserglases an der Oberfläche.

Das Bodenprobeninnere blieb weich. Die Bodenprobenoberfläche bekam nach 24 Stunden eine glasig-glänzende und harte Oberfläche. Die guten Werte der dränierten Scherfestigkeit und des Winkels der inneren Reibung sind auf das natürliche stabile Korngefüge (hoher Sand und Grobschluffanteil) und die Aushärtung des Wasserglases zurückzuführen.

**Tabelle 13:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 13.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>nicht bestimmt</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>7</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>18</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>25</b>	
<b>Scherwinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>33</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>23</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/78/125/153</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>5 (an Fließgrenze)</b>	<b>40</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>12</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>nicht bestimmt</b>	

## Bodenprobe 14: Lauenburger Ton

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus Lauenburg an der Elbe/Niedersachsen. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig, schwach sandig.

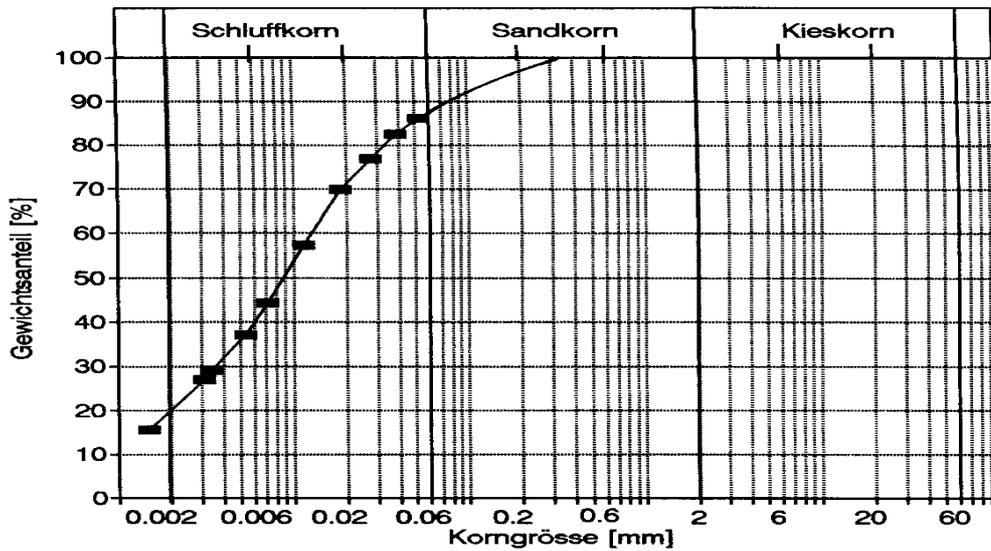


Abb. 14.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 14.

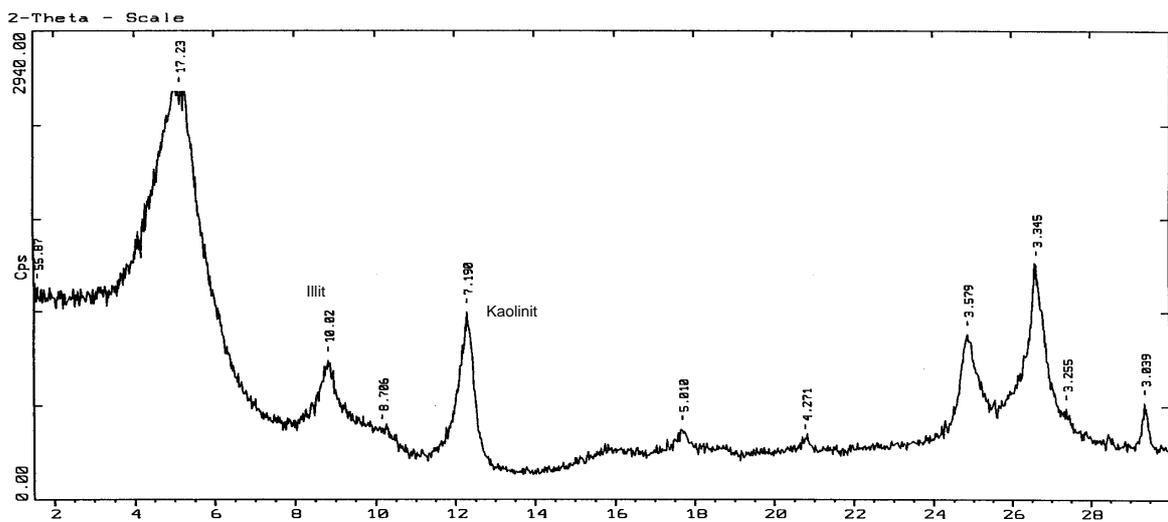


Abb. 14.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 14 (Mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen mittelplastischen Ton mit einem Tongehalt von 20 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 47 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Das Bodenprobenmaterial wird durch Zusatz von Natriumkarbonat verflüssigt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undräßierte Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 7 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 122 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undräßierte Scherfestigkeit 241 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 28 Grad.

**Tabelle 15:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 14.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>1,17</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>47</b>	
<b>Scherwinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>28</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>33</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/85/105/140</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>7 (an Fließgrenze)</b>	<b>241</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>20</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>0,4</b>	

## Bodenprobe 15: Rot-brauner Ton aus Böblingen

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Bohrung in Böblingen/Nordwürttemberg (RW: 3501113, HW: 5393477). Die Entnahmetiefe beträgt 4,0 - 5,0 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton und Schluff, sandig.

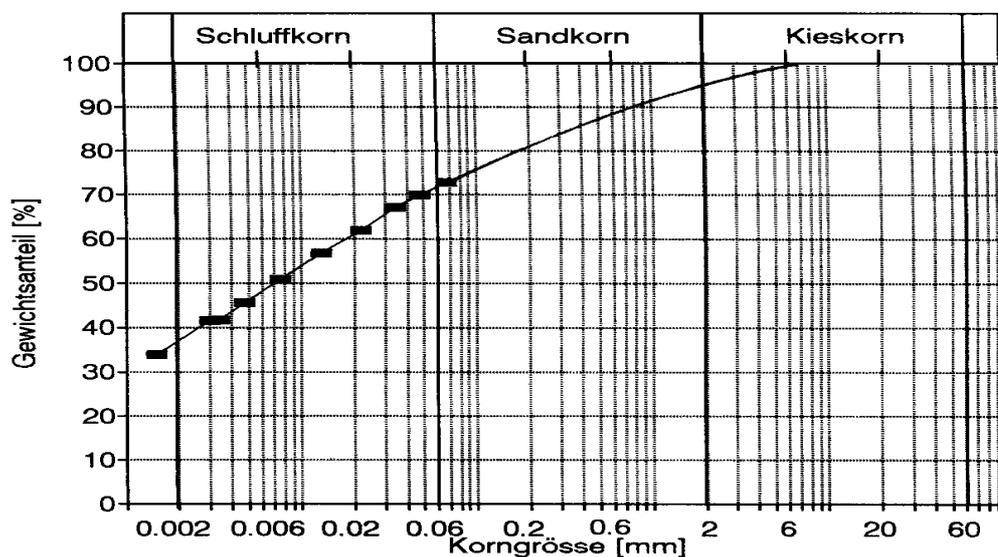


Abb. 15.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 15.

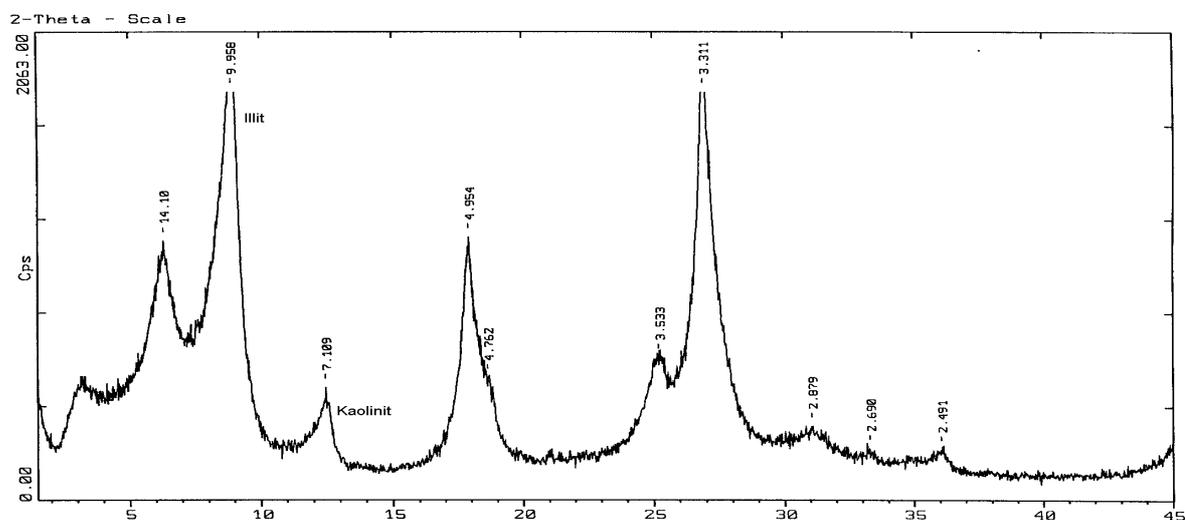


Abb. 15.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 15.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen rot-braunen leicht plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 36 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 32 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 9 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 121 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 438 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel beträgt 29 Grad.

**Tabelle 15:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 15.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,84</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>14</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>18</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>32</b>	
<b>Scherwinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>29</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>40</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>70/90/125/150</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>9 (an Fließgrenze)</b>	<b>438</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>36</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit</b>	<b>5,9</b>	

## Bodenprobe 16: Gelber Schluff aus Finnland

Herkunft:

Das Bodenmaterial stammt aus der Region von Siilinjärvi, nordwestlich von Kuopio, Finnland. Die Entnahmekoordinaten lauten 7002.32 (x), 3527.93 (Y), 94.00 (z). Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig, schwach sandig.

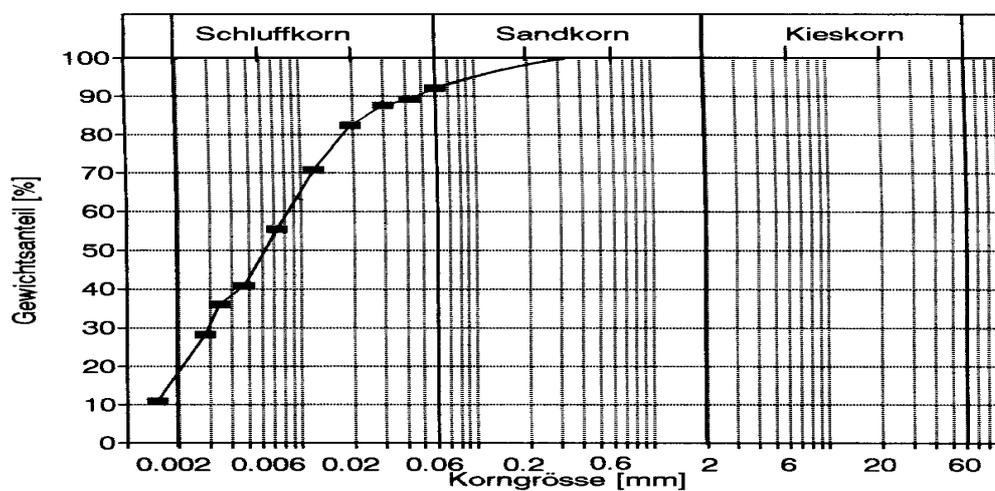


Abb. 16.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 16.

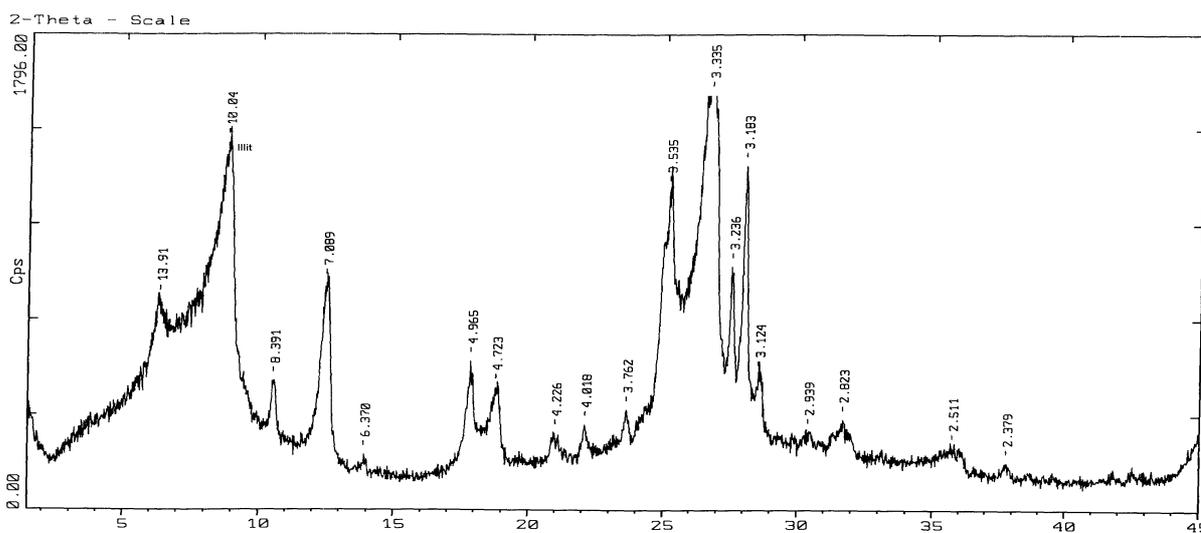


Abb. 16.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 16.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen gelben leicht plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 19 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 34 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von wasserglas steigt die undräßierte Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 4 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 402 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undräßierte Scherfestigkeit 687 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt einen Wert von 33 Grad.

**Tabelle 16:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 16.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,49</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>10</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>24</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>34</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>33</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>30</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>65/90/125/160</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>4 (an Fließgrenze)</b>	<b>580</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>19</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit</b>	<b>1,6</b>	

## Bodenprobe 17: Grauer Schluff aus Crildumersiel

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus Crildumersiel/Niedersachsen (nördlicher Teil). Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, stark sandig, schwach tonig.

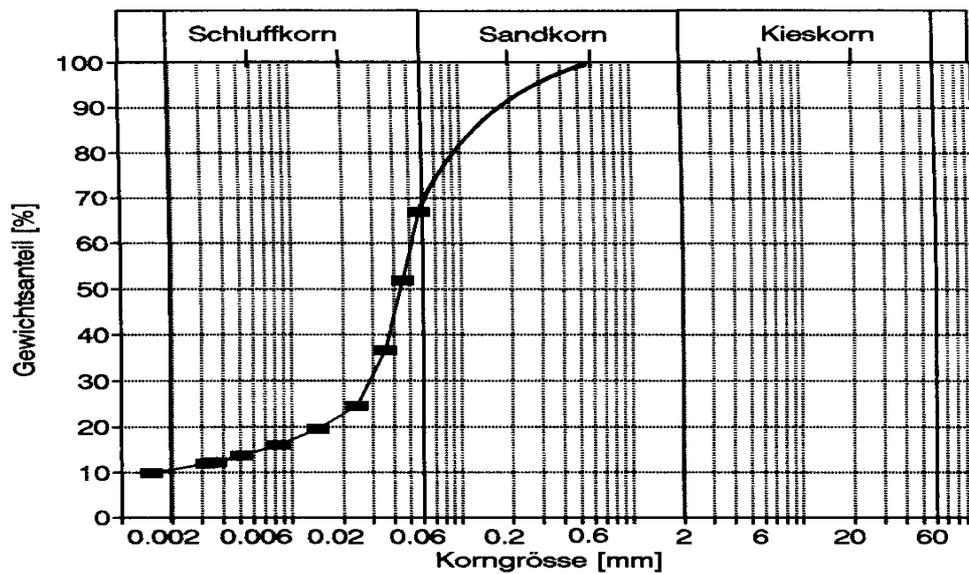


Abb. 17.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 17.

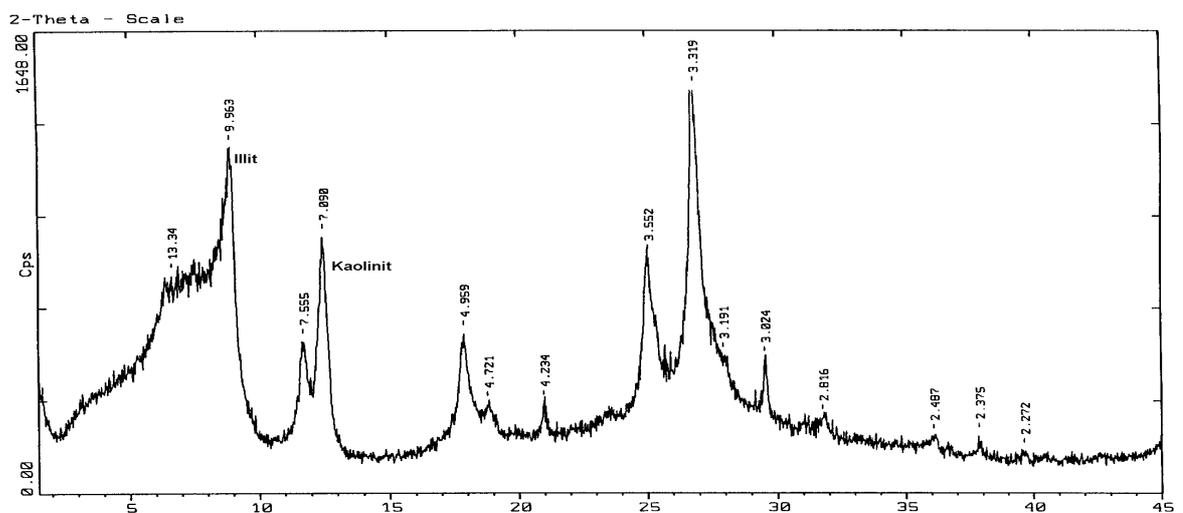


Abb. 17.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 17.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grauen mittelplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 11 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196. Die Tonfraktion weist relativ große Partikel auf, so daß der Eindruck entsteht, daß die Bodenprobe nur einen geringen Anteil an Ton besitzt.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 37 % entspricht mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 5 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 183 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 273 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel beträgt 28 Grad.

**Tabelle 17:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 17.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>1,31</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>14</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>37</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>28</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>):</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>28</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>):</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/70/115/13 5</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>):</b>	<b>5 (an Fließgrenze)</b>	<b>273</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>11</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit</b>	<b>1</b>	

## Bodenprobe 18: Grau-gelber Schluff aus Varel

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus Varel/Niedersachsen (am Jadebusen). Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, sandig, schwach tonig.

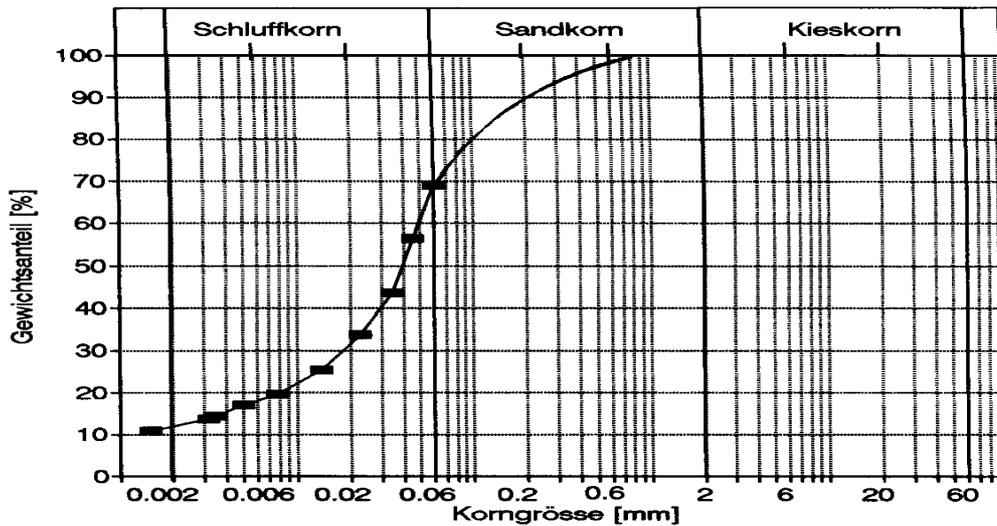


Abb. 18.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 18.

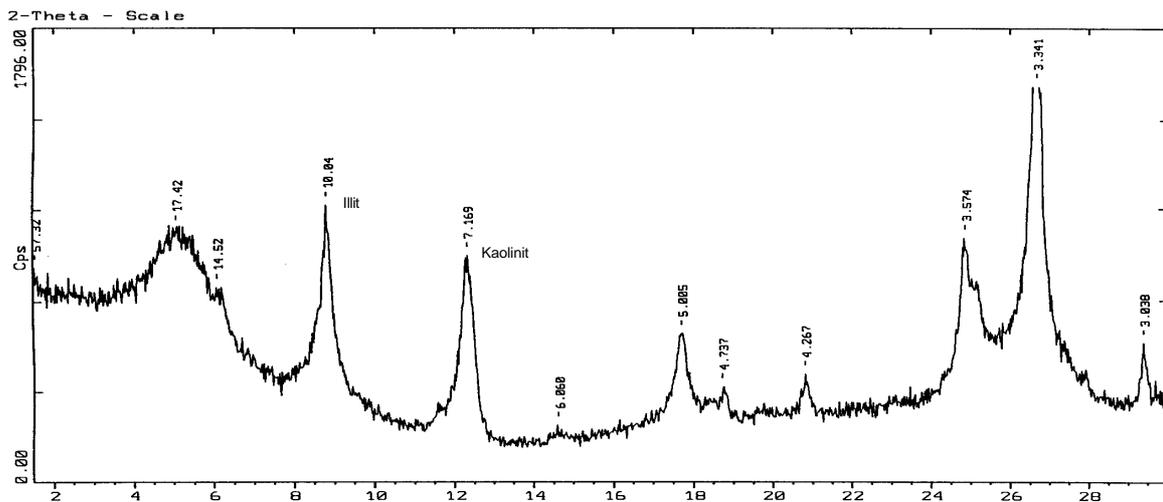


Abb. 18.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 18 (mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grau-gelben mittelplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 12 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 37 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 135 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 75 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 377 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel beträgt 33 Grad.

**Tabelle 18:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 18.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>1,25</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>15</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>22</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>37</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>33</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>21</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>55/83/118/150</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>6 (an Fließgrenze)</b>	<b>377</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>12</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>1,2</b>	

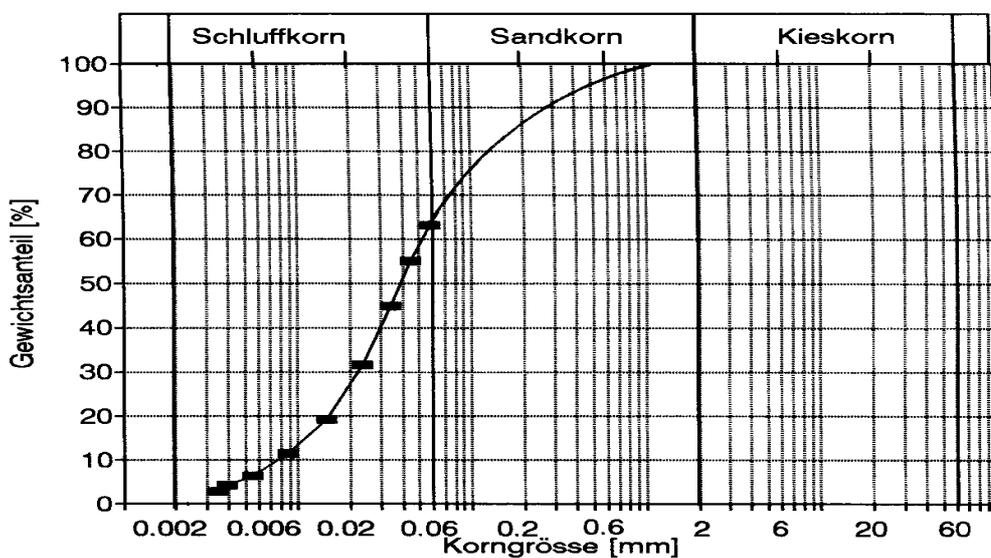
## Bodenprobe 19: Brauner Schluff aus Ladenburg

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Baugrube in Ladenburg/Nordbaden. Die Entnahmetiefe beträgt 1,2 - 2,4 m. Zeitlich ist die Bodenprobe dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, stark sandig.



**Abb. 19.1** Kornverteilungskurve der Bodenprobe 19.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen braunen leicht plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 2 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 28 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Die wesentlichen Daten entsprechen Bodenprobe 13. Eine Verfestigungsreaktion im eigentlichen Sinn findet nicht statt. Das Wasserglas härtete an der Oberfläche aus. Das Bodenprobeninnere blieb weich.

Die Bodenprobenoberfläche bekam nach 24 Stunden eine glasig-glänzende und harte Oberfläche. Die guten Werte des Winkels der inneren Reibung sind auf das natürliche stabile Korngefüge (hoher Sand und Grobschluffanteil) und die Aushärtung des Wasserglases zurückzuführen.

**Tabelle 19:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 19.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>nicht bestimmt</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>11</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>17</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>28</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>35</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>16</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>53/83/128/15 5</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>1 (an Fließgrenze)</b>	<b>40</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>2</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit</b>	<b>nicht bestimmt</b>	

## Bodenprobe 20: Grau-gelber Schluff aus Sinsheim

Herkunft:

Das Bodenmaterial stammt aus der Deponie Sinsheim/Nordbaden. Zeitlich ist das Bodenmaterial dem Keuper zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig und sandig.

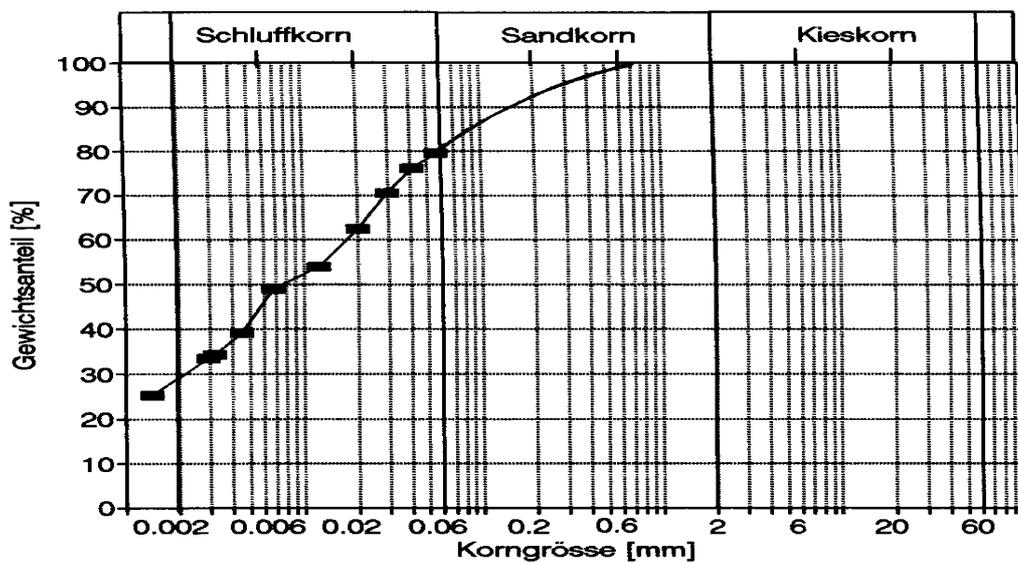


Abb. 20.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 20.

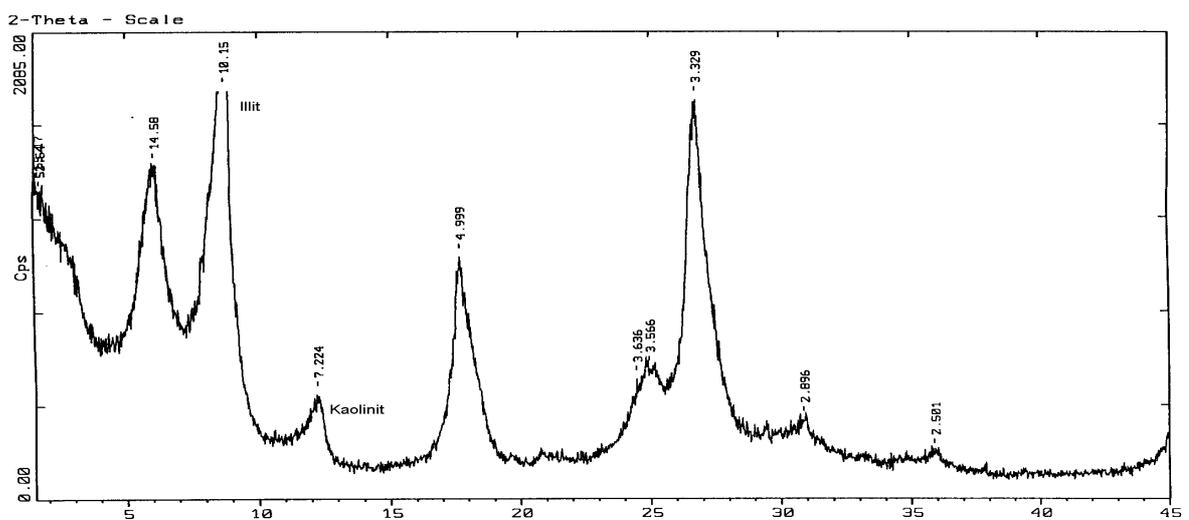


Abb. 20.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 20.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grau-gelben mittelplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 29 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 38 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undrained Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 5 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 44 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrained Scherfestigkeit 198 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 31 Grad.

**Tabelle 20:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 20.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,62</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>17</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>21</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>38</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>31</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>33</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/90/130/145</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>5 (an Fließgrenze)</b>	<b>198</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>29</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>6,2</b>	

## Bodenprobe 21: Grau-gelber Schluff aus Gemmingen-Eppingen

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus Gemmingen-Eppingen/Nordbaden. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Keuper zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, stark tonig, sandig.

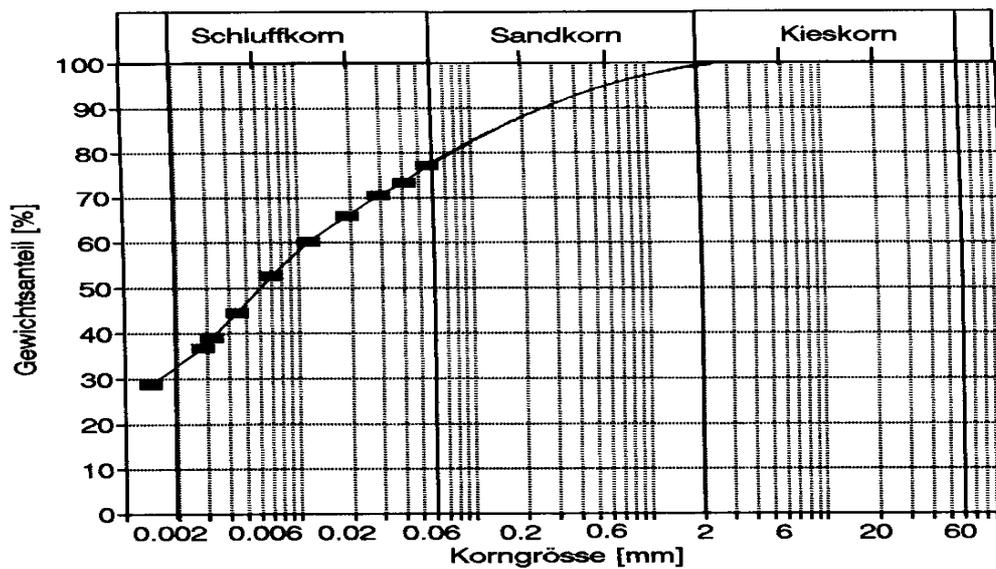


Abb. 21.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 21.

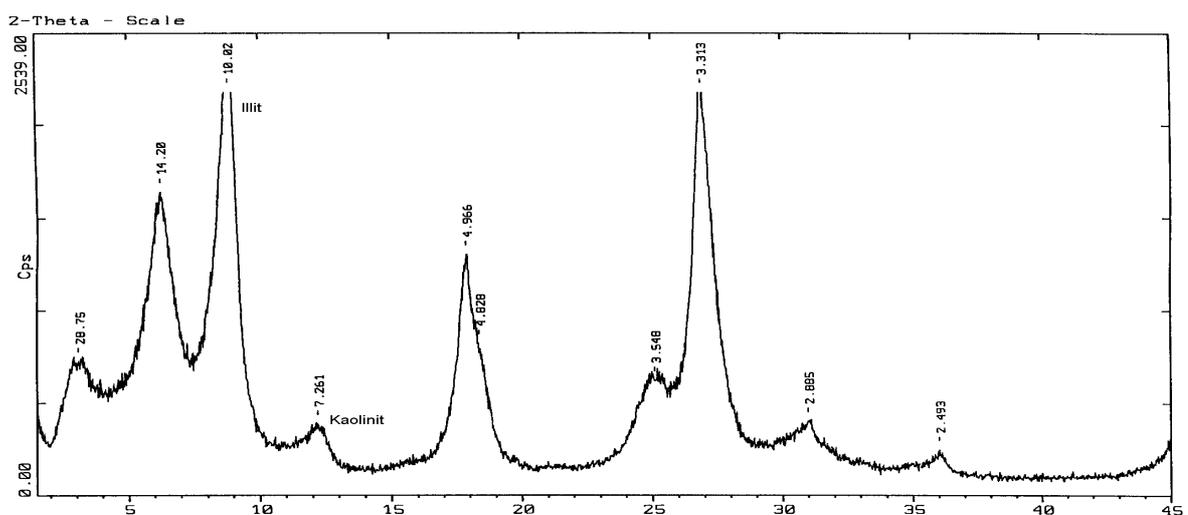


Abb. 21.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 21.

## Bodenprobe 23: Hellgrau-gelber Schluff aus Weinheim

Herkunft:

Das Probenmaterial stammt aus einer Bohrung im Bereich der Kapellenstraße in Weinheim/Nordbaden. Die Entnahmetiefe beträgt 3,50 - 4,0 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig.

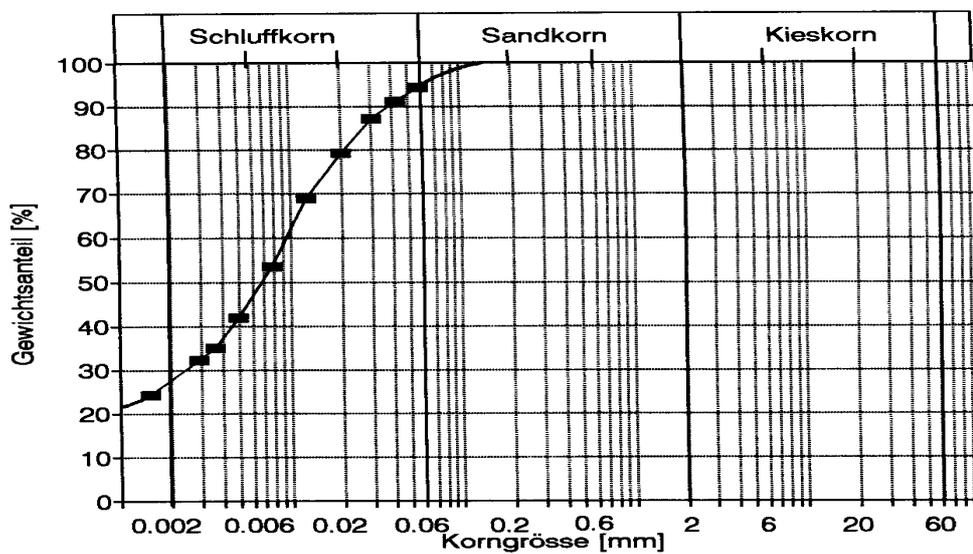


Abb. 23.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 23.

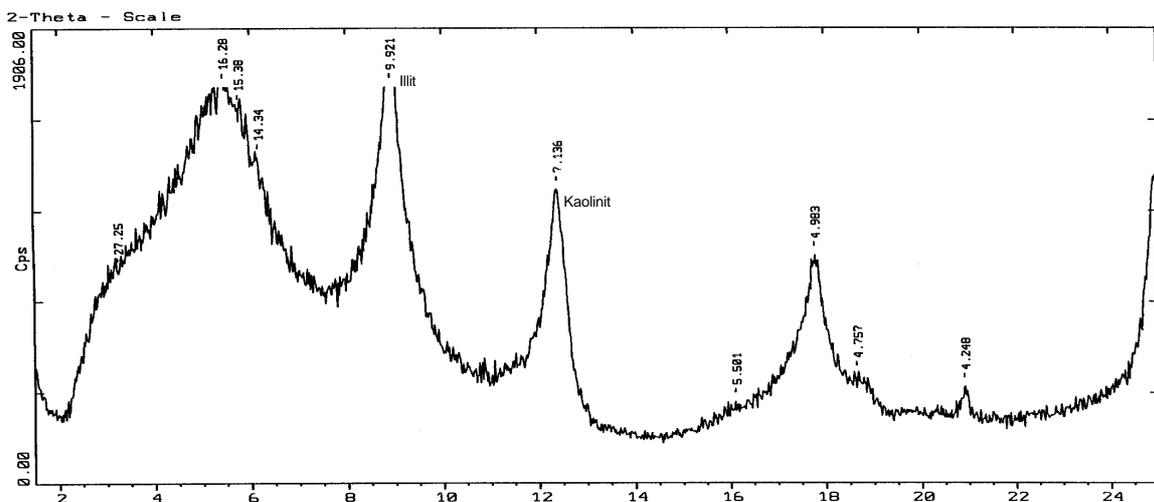


Abb. 23.1 Röntgendiagramm der Bodenprobe 23 (mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen hellgrauen - gelblichen ausgeprägt plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 45 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 59 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 4 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 45 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 324 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 27 Grad.

**Tabelle 23:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 23.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,77</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>35</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>24</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>59</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>27</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>29</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>55/78/110/160</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>4 (an Fließgrenze)</b>	<b>324</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>45</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>1</b>	

## Bodenprobe 24: Braun-schwarzer Ton aus Hooksiel

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial (Marschenboden) stammt aus der Region um Hooksiel/ Niedersachsen (nördlicher Teil). Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Ton, stark schluffig.

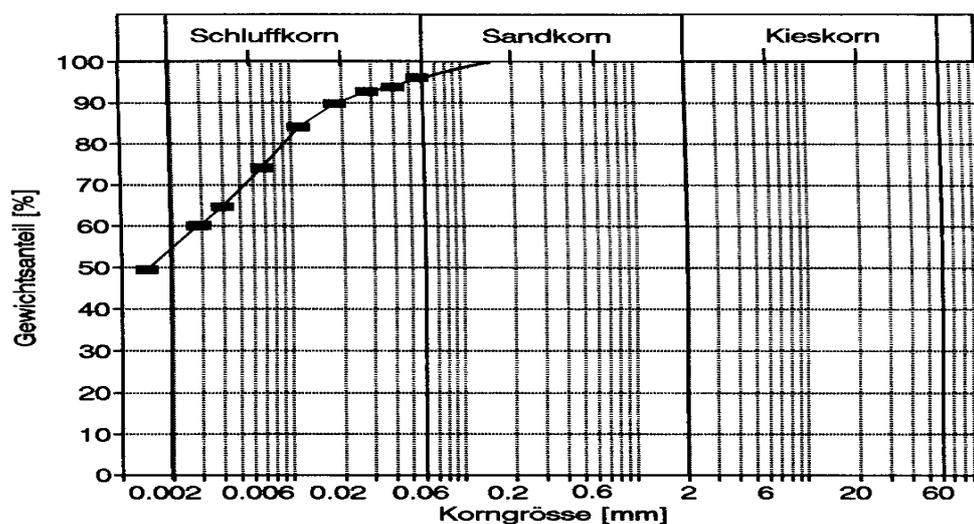


Abb. 24.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 24.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen braun - schwarzen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 54 % und organischen Beimengungen. Es gehört zur Bodengruppe OT nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 129 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 7 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 42 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an.

Nach 24 Stunden beträgt die undrainede Scherfestigkeit 68 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 1 Grad.

**Tabelle 25:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 24.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>1,31</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>71</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>58</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>129</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>1</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>22</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>22,5/25/25/-</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>7 (an Fließgrenze)</b>	<b>68</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>54</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>nicht bestimmt</b>	

## Bodenprobe 25: Schwarzer Schluff aus Frankfurt

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Bohrung in der Voltastraße in Frankfurt/Südhessen. Die Entnahmetiefe beträgt 1,30 - 1,60 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff und Sand, schwach tonig.

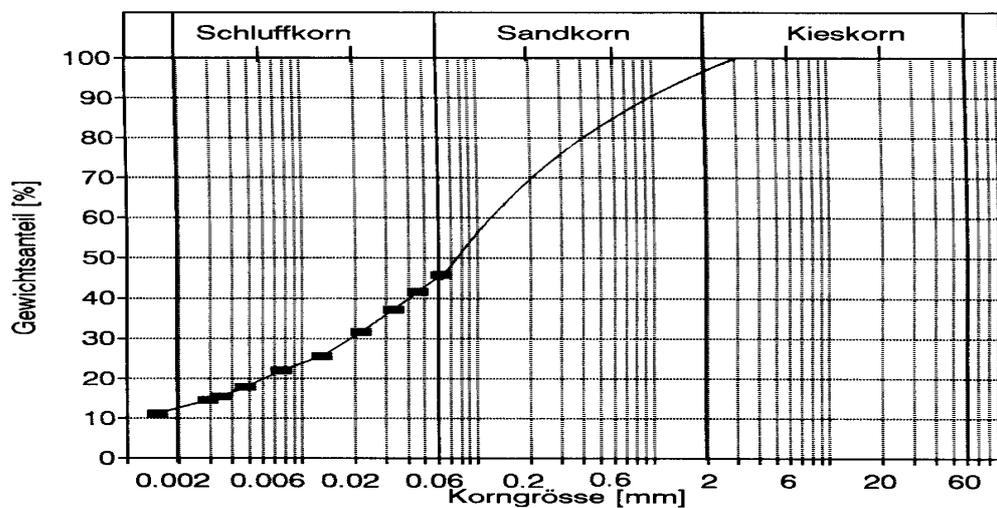


Abb. 25.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 25.

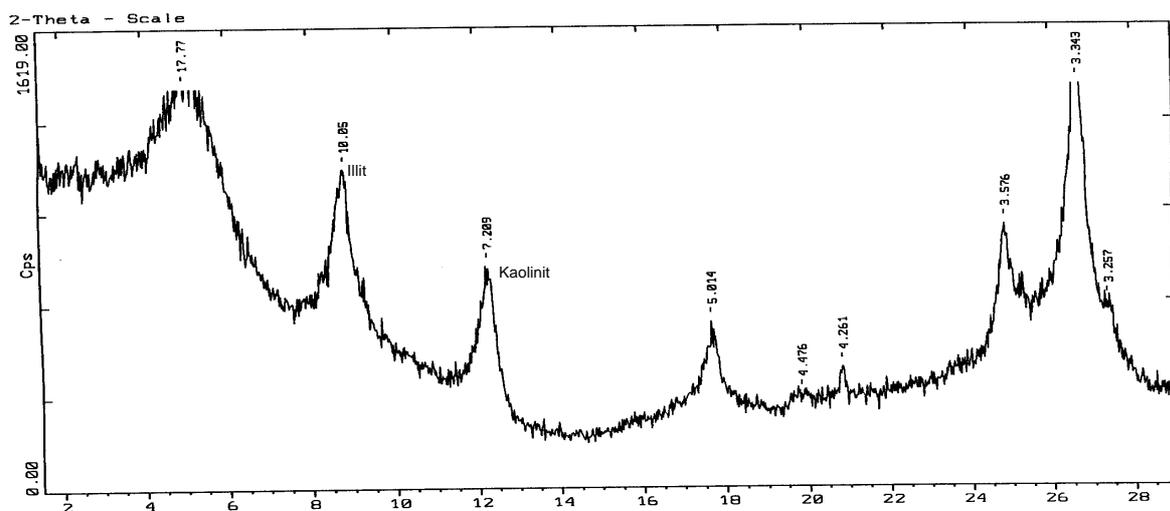


Abb. 25.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 25 (mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen schwarzen mittelplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 12 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 45 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undrained Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 1 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 155 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrained Scherfestigkeit 162 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 26 Grad.

**Tabelle 25:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 25.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>1,41</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>21</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>24</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>45</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>26</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>39</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/95/110/13 8</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>1 (an Fließgrenze)</b>	<b>162</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>12</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>1,4</b>	

## Bodenprobe 26: Hellgrauer Schluff aus Frankfurt

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Bohrung in der Voltastraße in Frankfurt/Südhessen. Die Entnahmetiefe beträgt 15,65 - 16,80 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär (Hydrobienschichten) zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig und sandig.

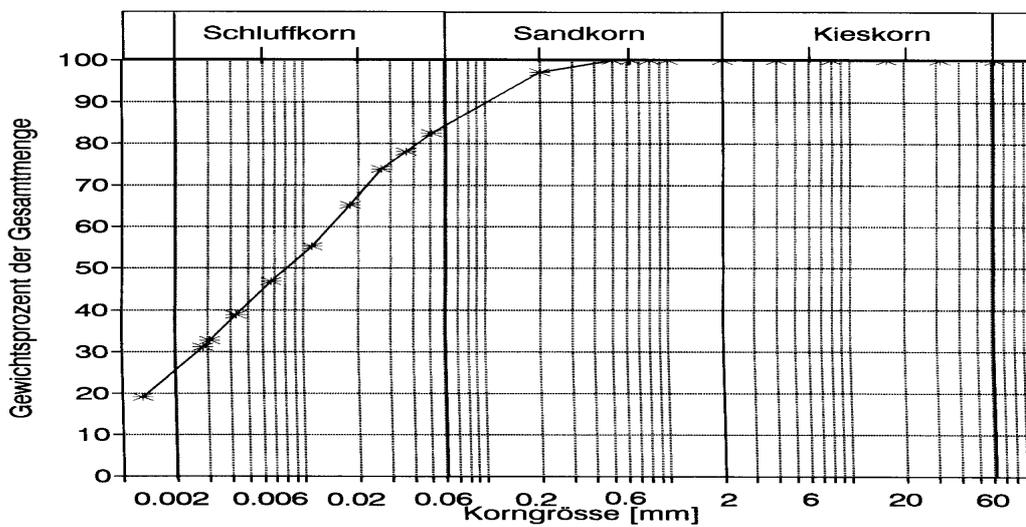


Abb. 26.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 26.

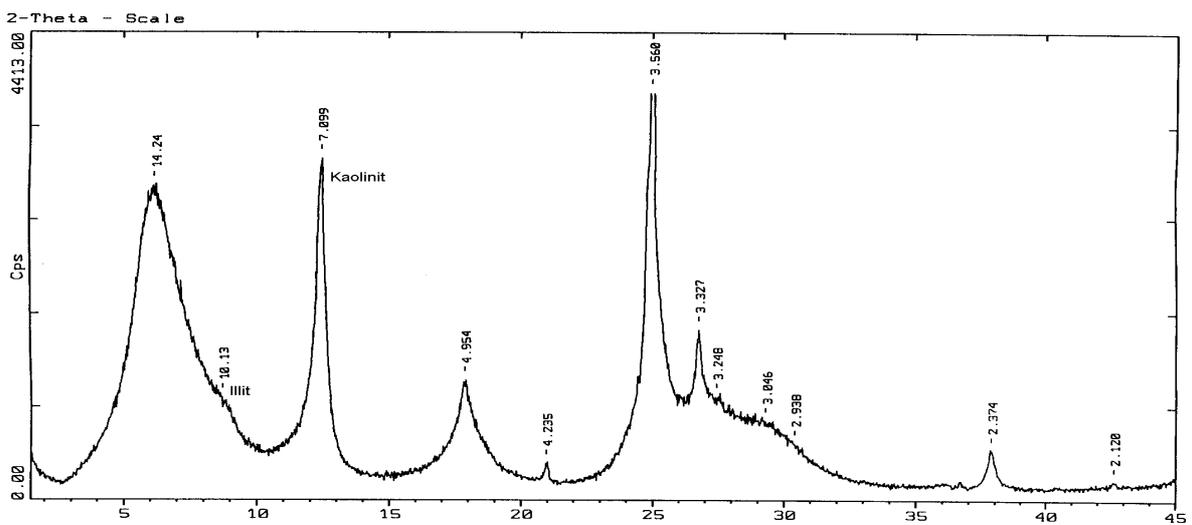


Abb. 26.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 26.

Bodengruppe:

Es handelt sich bei dem Bodenprobenmaterial um einen hellgrauen ausgeprägt plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 26 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 58 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undrained Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 4 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 148 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrained Scherfestigkeit 271 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 22 Grad.

**Tabelle 27:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 26.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,74</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>39</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>19</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>58</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>22</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>40</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/80/105/120</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>4 (an Fließgrenze)</b>	<b>271</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>25</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit</b>	<b>&lt; 0,1</b>	

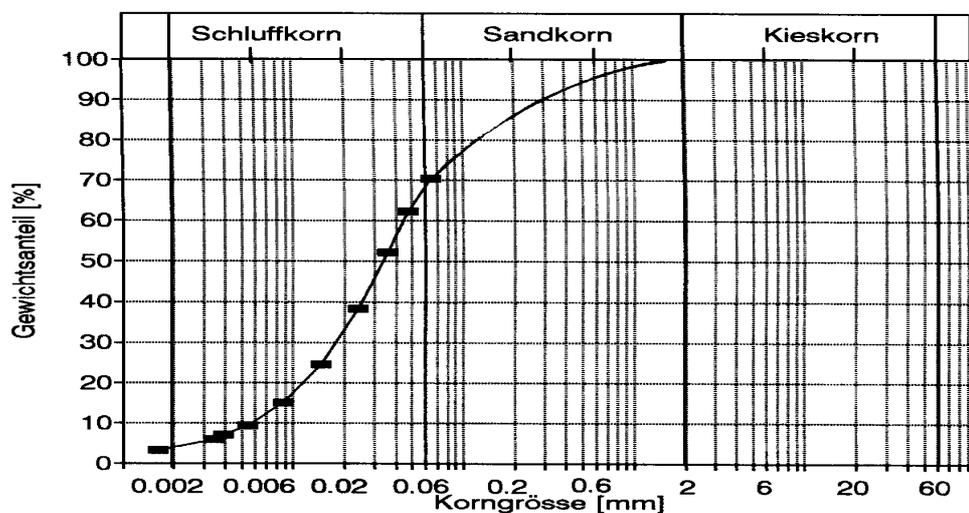
## Bodenprobe 27: Hellbrauner Schluff aus Ladenburg

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Bohrung in Ladenburg /Nordbaden. Die Entnahmetiefe beträgt 2,5 - 3,4 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, stark sandig.



**Abb. 27.1** Kornverteilungskurve der Bodenprobe 27.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen hellbraunen, leichtplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 4 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 35 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Nach Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen war die einzige Reaktion die Aushärtung des Wasserglases an der Probenoberfläche. Das Bodenprobeninnere blieb weich. Die Bodenprobenoberfläche bekam nach 24 Stunden eine glasig-glänzende und harte Oberfläche.

Die guten Werte der dränierten Scherfestigkeit und des Winkels der inneren Reibung sind auf das natürliche stabile Korngefüge (hoher Sand und Grobschluffanteil) und die Aushärtung des Wasserglases zurückzuführen.

**Tabelle 27:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 27.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>nicht bestimmt</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>15</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>19</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>35</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>35</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>20</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>58/83/130/15 8</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>1 (an Fließgrenze)</b>	<b>40</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>4</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>nicht bestimmt</b>	

## Bodenprobe 28: Hellgrau-gelber Ton aus Frankfurt

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Bohrung in der Voltastraße in Frankfurt/Südhessen. Die Entnahmetiefe beträgt 13,50 - 14,00 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär (Hydrobienschichten) zuzuordnen.

Bodenart:

Ton und Schluff, sandig.

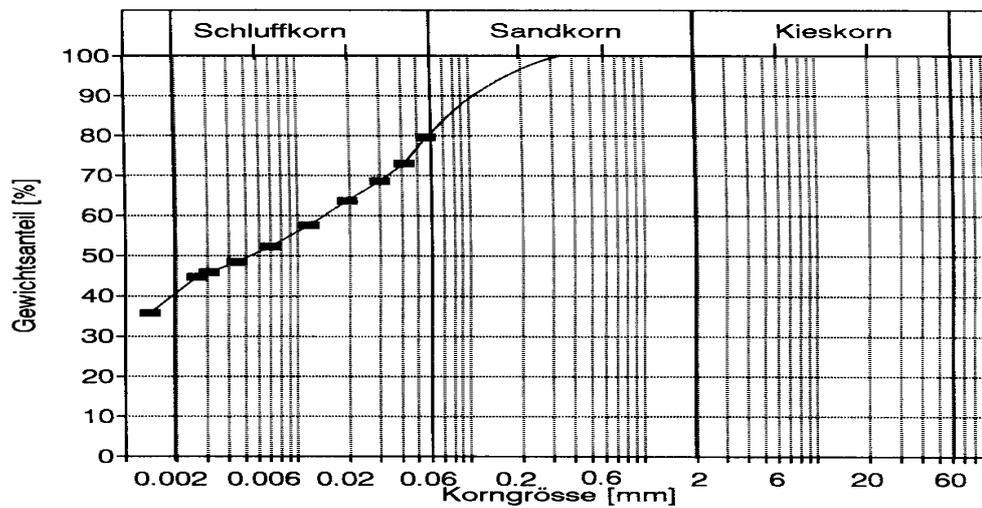


Abb. 28.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 28.

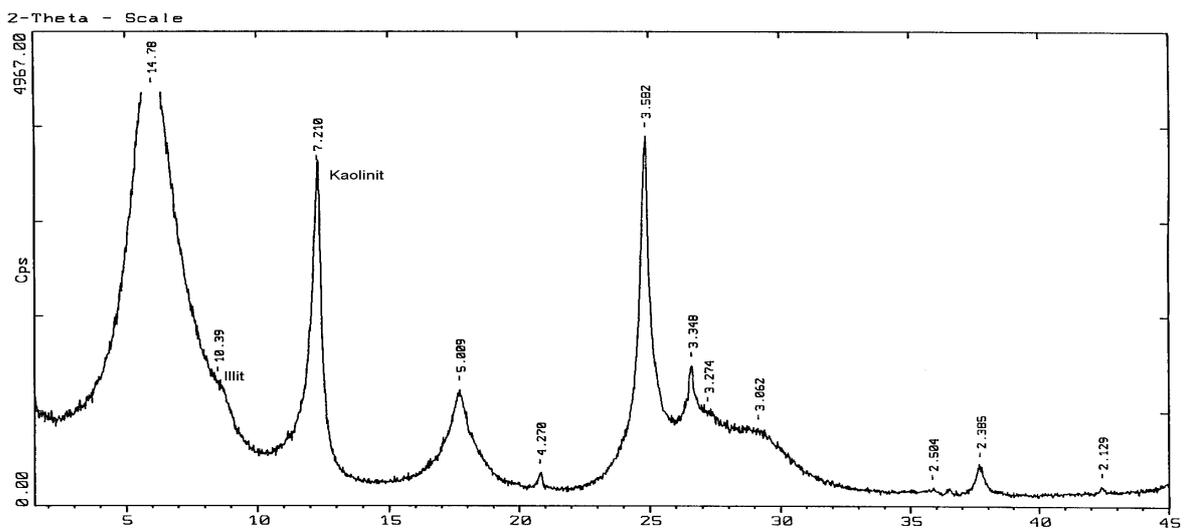


Abb. 28.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 28.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen hellgrauen - gelben ausgeprägt plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 40 %. Es gehört zur Bodengruppe TA nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 52 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe steigt die undrainede Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 180 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undrainede Scherfestigkeit 260 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 24 Grad.

**Tabelle 28:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 28

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,81</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>32</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>20</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>52</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>24</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>38</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/85/100/130</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>303</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>40</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit :</b>	<b>&lt; 0,1</b>	

## Bodenprobe 29: Grauer Schluff aus Frankfurt

Herkunft:

Das Bodenprobenmaterial stammt aus einer Bohrung in der Voltastraße in Frankfurt/Südhessen. Die Entnahmetiefe beträgt 1,60 - 2,10 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Tertiär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, stark tonig (große Tonplättchen vorhanden).

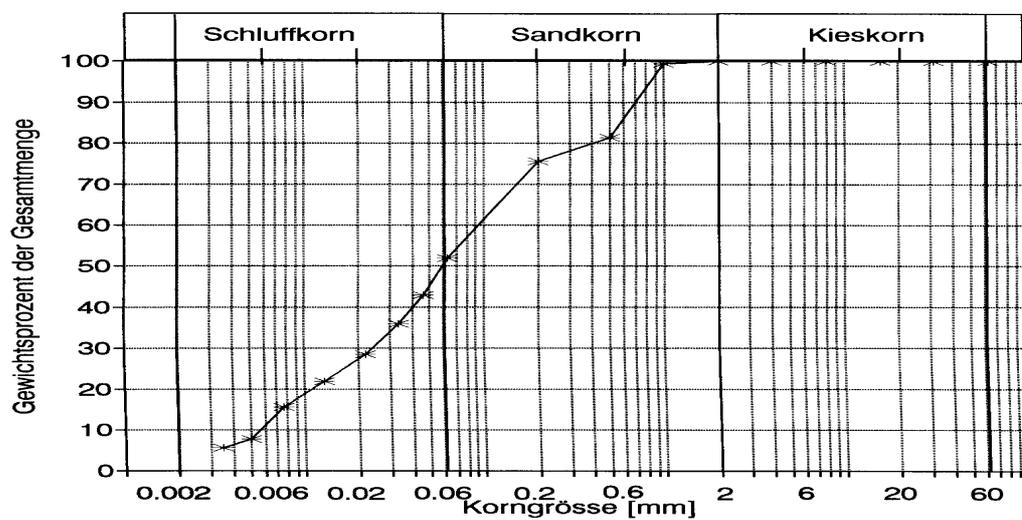


Abb. 29.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 29.

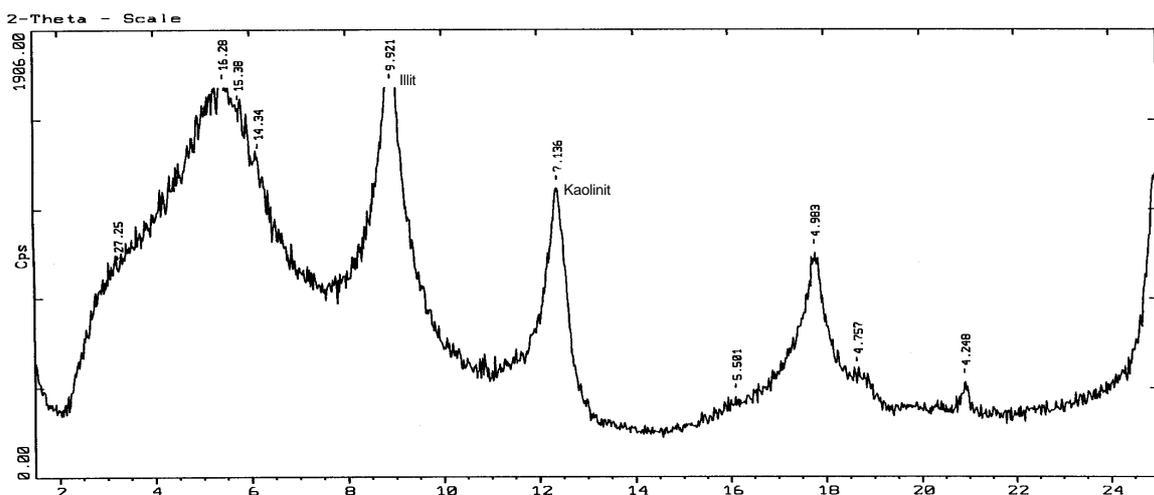


Abb. 29.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 29 (mit Glycol behandelt).

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grauen leicht plastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 5 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 31 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 4 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 103 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 158 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel beträgt 31 Grad.

**Tabelle 29:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 29.

<b>Zusatz con Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>2,03</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>13</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>18</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>31</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>31</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>35</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>70/90/125/160</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>4 (an Fließgrenze)</b>	<b>158</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>5</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>1,3</b>	

## Bodenprobe 30: Brauner Schluff aus Siersburg

Herkunft:

Das Bodenmaterial stammt aus einer Baugrube in Rehlingen-Siersburg/Saarland (nördlich von Saarlouis). Die Entnahmetiefe beträgt 2,5-4,2 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, stark sandig, tonig.

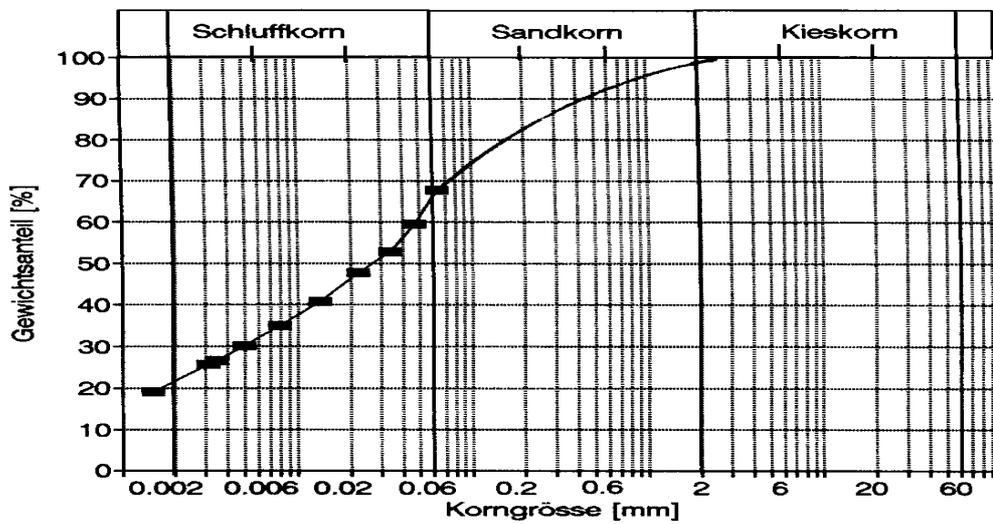


Abb. 30.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 30.

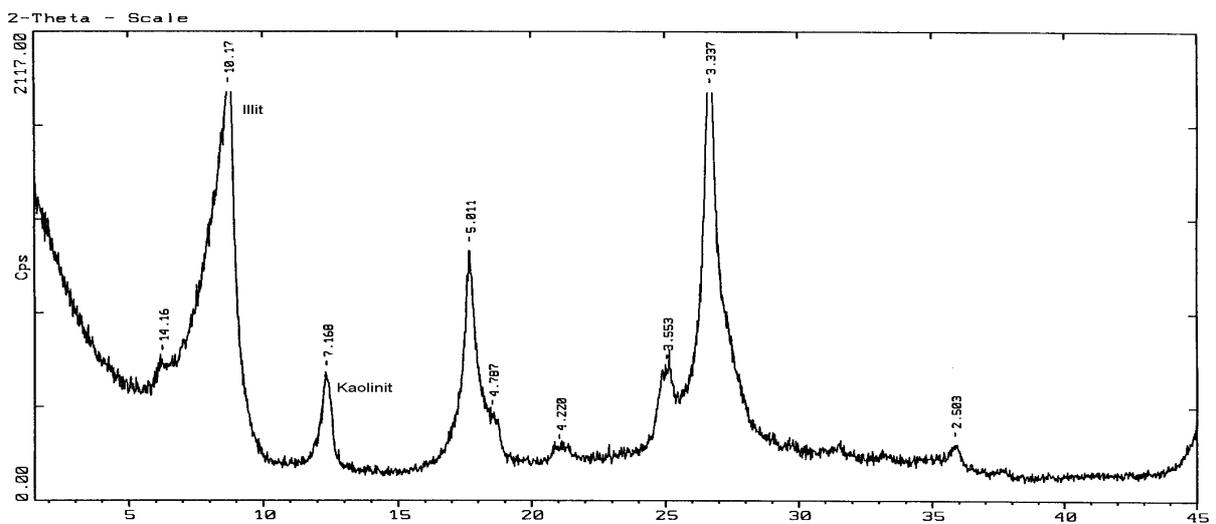


Abb. 30.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 30.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen braunen leichtplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 22 %. Es gehört zur Bodengruppe TL nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze was einem Wassergehalt von 32 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undränierete Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 3 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 83 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undränierete Scherfestigkeit 131 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 35 Grad.

**Tabelle 30:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 30.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,72</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>15</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>17</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>32</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>37</b>	<b>35</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>24</b>	<b>24</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>60 (50)/178 (200)</b>	<b>60/93/128/16 5</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>3 (an Fließgrenze)</b>	<b>131</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>22</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>3,8</b>	

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grau-gelben mittelplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 33 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 40 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undräßierte Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 5 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 78 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undräßierte Scherfestigkeit 294 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 33 Grad. Die Unterschiede der Verfestigung zwischen Bodenprobe 20 und 21 lassen sich auf einen unterschiedlich hohen Illitgehalt zurückführen.

**Tabelle 22:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 21.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,53</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>17</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>23</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>40</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>32</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>30</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>60/93/125/153</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>11 (an Fließgrenze)</b>	<b>294</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>33</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>11,3</b>	

## Bodenprobe 22: Grauer Schluff aus Weinheim

Herkunft:

Das Pobenmaterial stammt aus einer Bohrung (RW: 3473928, HW: 5490095) in Weinheim/Nordbaden. Die Entnahmetiefe beträgt 3,50 - 4,00 m. Zeitlich ist das Bodenprobenmaterial dem Quartär zuzuordnen.

Bodenart:

Schluff, tonig, schwach sandig.

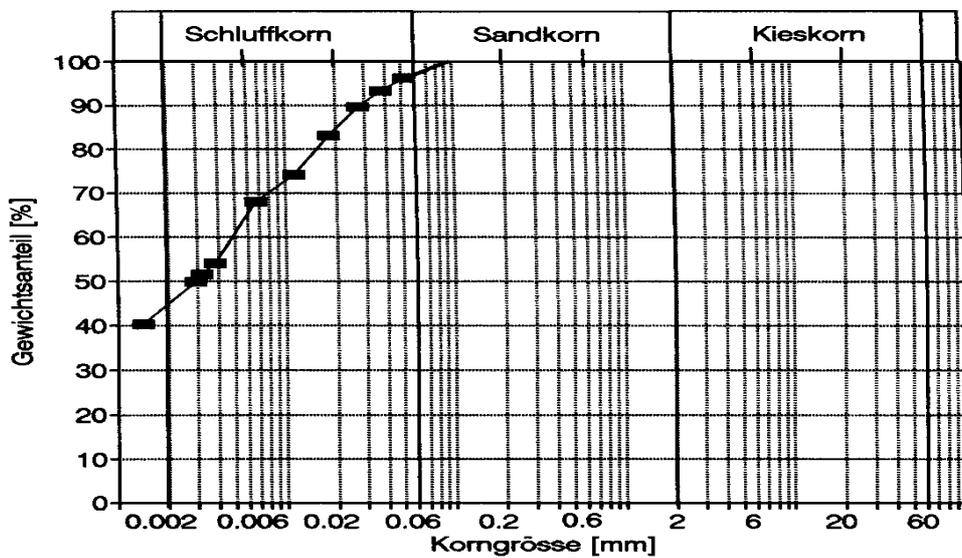


Abb. 22.1 Kornverteilungskurve der Bodenprobe 22.

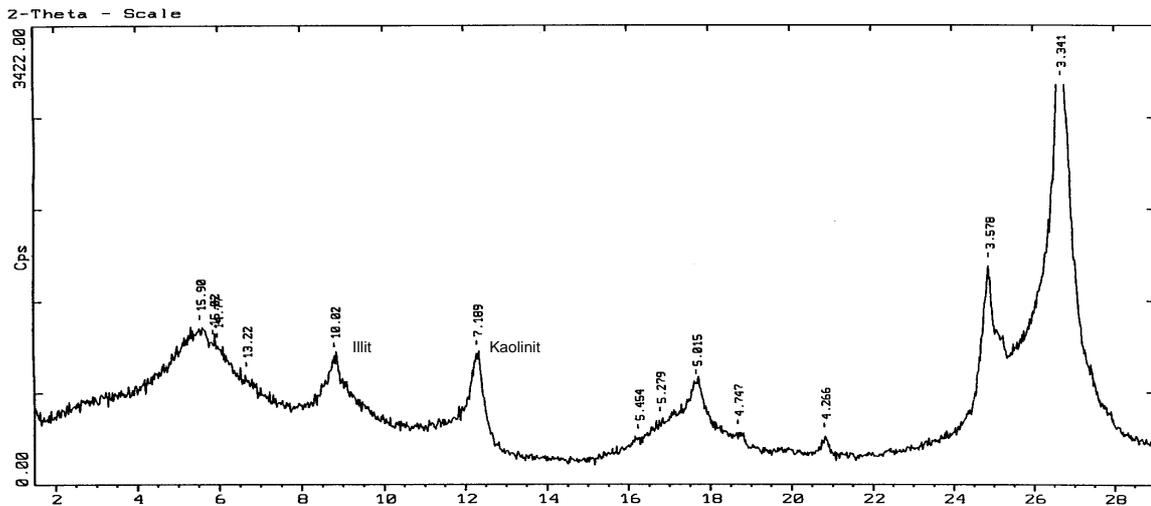


Abb. 22.2 Röntgendiagramm der Bodenprobe 22.

Bodengruppe:

Bei dem Bodenprobenmaterial handelt es sich um einen grauen mittelplastischen Ton mit einem Anteil der Tonfraktion von 27 %. Es gehört zur Bodengruppe TM nach DIN 18196.

Wassergehalt bei Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen:

Das Bodenprobenmaterial wurde an der Fließgrenze, was einem Wassergehalt von 39 % entspricht, mit Wasserglas-Soda-Gemischen behandelt.

Beobachtungen zur sich einstellenden Verfestigung:

Eine Verflüssigung durch Zusatz von Natriumkarbonat wurde nicht festgestellt. Nach zusätzlicher Zugabe von Wasserglas steigt die undräßierte Scherfestigkeit innerhalb von 15 Minuten von 14 kN/m<sup>2</sup> (unbehandelt) auf 45 kN/m<sup>2</sup> (behandelt) an. Nach 24 Stunden beträgt die undräßierte Scherfestigkeit 302 kN/m<sup>2</sup>. Der Reibungswinkel ergibt 31 Grad.

**Tabelle 23:** Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen von Bodenprobe 22.

<b>Zusatz von Wasserglas-Soda:</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
<b>Aktivitätszahl:</b>	<b>0,73</b>	
<b>Plastizitätszahl [%]:</b>	<b>20</b>	
<b>Ausrollgrenze [%]:</b>	<b>20</b>	
<b>Fließgrenze [%]:</b>	<b>39</b>	
<b>Reibungswinkel [Grad]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>31</b>
<b>Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>24</b>
<b>Scherfestigkeit dr. [50/100/150/200 kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>nicht meßbar</b>	<b>56/83/114/147</b>
<b>Scherfestigkeit udr. [kN/m<sup>2</sup>]:</b>	<b>14 (an Fließgrenze)</b>	<b>302</b>
<b>Tongehalt [%]:</b>	<b>27</b>	
<b>[001]-Basisreflex-Verh. von Illit/Kaolinit:</b>	<b>0,4</b>	

