Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

> Schriftenreihe Heft 4

Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten Silikatgel-injizierter Sande

von

Arndt Schubert

München, 1985

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

Eigenverlag: Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik Technische Universität München Baumbachstraße 7 8000 München 60 Tel.: (089) 8895-200

DISSERTATIONS - UND FOTODRUCK FRANK GmbH 8000 München 2, Gabelsbergerstraße 15, Tel. 2809090

Vorwort

Die versuchstechnischen Unterlagen zu der vorliegenden Arbeit gehen zum überwiegenden Teil auf einen Forschungsauftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau zurück, dem für diese Förderung Dank ausgesprochen sei.

Die Anregung zu dieser Arbeit erfolgte noch durch meinen Lehrer, Herrn Prof.Dr.-Ing. R.Jelinek. Nach seiner Emeritierung wurde sie von seinem Nachfolger, Herrn Prof. Dr.-Ing. R.Floss, weiterbetreut, der sich auch zur Obernahme des Hauptreferates zur Verfügung stellte. Für ihr Interesse und die Unterstützung möchte ich beiden Herren sehr herzlich danken. Der Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. R.Springenschmid für die bereitwillige Obernahme des Korreferates.

Danken möchte ich auch meinen Kollegen, vor allem Herrn Dipl.-Ing. H.Laier, für manche Hilfe und wertvollen Hinweis während der Entstehung dieser Arbeit.

Arndt Schubert

x

Seite

1		1
1.	Einieitung	1
	1.1 Derzeitiger Wissenstand und Verfahren 1.2 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit	3 6
2	Versuchsanordnung	7
۰.	2 1 Versuchsanlage. Probenherstellung	
	und Probenalter	7
	2.2 Versuchsmaterialien	9
	2.2.1 Sande	9
	2.2.1.1 Fein- bis Mittelsande (fmS)	9
	2.2.1.2 Mittel- bis Grobsande (mgS)	10
	2.2.1.5 Mittersande (m5)	12
2	Chomicmus don Silikataolbildung	14
з. л	Vensushedunghführung und -reihon	18
4.	A 1 Finflußfaktoren	18
	4.2 Einaxiale Druckversuche	20
	4.3 Einaxiale Retardationsversuche	21
5.	Versuchsergebnisse	21
	5.1 Einaxiale Druckversuche	21
	5.1.1 Abhängigkeit von der Dichte	21
	5.1.2 Abhängigkeit von der Korngröße	22
	5.1.4 Abhängigkeit von der Temperatur	23
	5.1.5 Abhängigkeit von der Stauchungs-	20
	geschwindigkeit	24
	5.2 Einaxiale Retardationsversuche	24
	5.2.1 Abhängigkeit von der Spannung und	24
	der Dichte	6-7
	5.2.2 Abhängigkeit von der Korngröße	25
	5.2.4 Abhängigkeit von der Temperatur	29
	5.2.5 Einfluß der Größe der Laststufen	
	aut das Spannungs-Vertormungs- verhalten der Proben	30
	5.3 Wertung der Versuchsergebnisse	31
		01

6.	Fehleranalyse	34
	6.1 Fehlerguellen bei der Probenherstellung	34
	5.2 Meßtechnische Fehlerquellen	35
7.	Kriechverhalten von Böden	38
	7.1 Allgemeine Grundlagen des Kriech-	
	verhaltens 7.2 Kuischfunktion mach Cinch u. Mitchell	38
_	7.2 Kriechtunktion nach Singh u. Mitchell	41
8.	Kriechverhalten silikatgel-injizierter Sande	45
	8.1 Übertragbarkeit der Kriechfunktion von	
	Singh u.Mitchell auf das Kriechverhalten silikatgol-iniizionton Sando	45
	8.2 Mathematische Erfassung des Kriechens	40
	silikatgel-injizierter Sande	51
	8.2.1 Nach Singh und Mitchell	51
	8.2.2 Delogarithmierung des	
	log ε/log t-Diagrammes	53
9.	Sicherheitsreserven und Versagenswahr-	
	scheinlichkeit	57
	9.1 Vergleich Labor- und Baustellenbedin-	
	gungen 9 2 Finfluß des Spannungszustandes beim	58
	Verpressen	59
	9.3 Einfluß des Seitendrucks, dreiaxiale	
	Retardationsversuche 9 4 "a-priori"-Vonsagenswahrscheinlichkeit	62
1.0	3.4 a-priori -versagenswanrschernitchkert	05
10.	Zusammentassung und Ausblick	65
	Literaturverzeichnis	68
	Verzeichnis der Bilder	72
	Verzeichnis der Anlagen	73

Verwendete Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

```
()
                         Literaturhinweis
()
                         mathematische Gleichung
Mathematische und bodenmechanische Symbole
° c
                         Temperatur in Grad Celsius
d
     {cm}
                         Probendurchmesser
D
     { - }
                         Lagerungsdichte
     \{kN/m^2\}
D
                         Spannungsintensität (Deviator-
                         spannung)
e
                         Basis der natürlichen Logarithmen
ė
     {% von h/min}
                         Stauchungsgeschwindigkeit
∆Gi
     { q }
                         Gewichtszunahme durch Injektion
h
     {cm}
                         Probenanfangshöhe
Гр
     { -}
                         Porenfüllungsgrad
ŕ
     {mm/min}
                         Verformungsgeschwindigkeit
ln
                         natUrlicher Logarithmus
10g
                         dekadischer Logarithmus
     { tg α}
                         Steigung der Geraden im lne/int-
m
                         Diagramm, nach Singh und Mitchell
                         Kriechpotential
                         Probenanzah]
n
     {bar}
                         Injektionsdruck
p,
     \{MN/m^2\}
٩u
                         einaxiale Druckfestigkeit
     \{kN/m^2\}
s
                         Standardabweichung bei der Ver-
                         sagenswahrscheinlichkeit
t
     {h}
                         Zeit
     \{cm^3\}
۷<sub>n</sub>
                         rechnerisches Porenvolumen
```

W	{ % }	Wassergehalt
Wpr	{%}	optimaler Wassergehalt beim Proctorversuch
₩sv	{%}	Synäresewassergehalt
Χ̈́	{kN/m ² }	Mittelwerte bei der Versagens- wahrscheinlichkeit
fms		Fein- bis Mittelsande
M S		Mittelsande
mgS		Mittel- bis Grobsande

α	{Grad}	Neigungswinkel der Geraden im lnc/D _o -Diagramm
ε	{% von h}	axiale Stauchung
ε _b	{% von h}	Bruchstauchung
ε ₀ β	{% von h}	Sofortverformung
ε	{% von h}	axiale Stauchung nach 1 Tag
ε ₇	{% von h}	axiale Stauchung nach 7 Tagen
ε	{% von h/Std}	Stauchungsrate
$\dot{\epsilon}_{(1)}$	{% von h/Std}	fiktive Stauchungsrate zur Zeit t = 1
ε ₇	{% von h/Std}	Stauchungsrate nach 7 Tagen
εt	{ - }	"Kriechmaß"
η		Sicherheitsfaktor
٥d	{t/m ³ }	Trockendichte
۹ f	{t/m ³ }	Feuchtdichte
ρ _{nr}	$\{t/m^3\}$	Proctordichte
ρ _s	{t/m ³ }	Korndichte
°1	{kN/m ² }	axiale Spannung
^σ 2,3	{kN/m ² }	Hauptspannungen

0 p	$\{kN/m^2\}$	Biegezugspannung
σ'n	$\{kN/m^2\}$	Druckspannung
τ	{kN/m ² }	Schubspannung
Chei	mische Symbole	
⁰ Bé		Grad Beaumé, Angabe der Dichte von Chemikalien
C		Trockenextrakt
н		Wasserstoff
Mol		Molekulargewicht
n		Verhältnis der Molekulargewichte
Na		Natrium
0		Sauerstoff
s		Schwefel
Si		Silizium

1. Einleitung

Einpreßarbeiten zur Abdichtung und Verfestigung des Baugrundes sind heute ein im Grundbau vielfach angewendetes Spezialverfahren mit einer breiten Anwendungspalette. Sie finden im Talsperrenbau (Injektionsschleier), U-Bahn-Bau (Gewölbeinjektion) und als Unterfangungsmaßnahme (Giebelunterfangung) ihre Hauptanwendung.

Steigende Grundstückspreise haben besonders im innerstädtischen Bereich dazu geführt, daß bei Neubauten häufig mehrere Untergeschosse unter Gelände einbinden. Dies hat zur Folge, daß während der Gründungsarbeiten Maßnahmen zur Sicherung der angrenzenden Nachbarbebauung getroffen werden müssen. Als eine platzsparende und in wirtschaftlicher Hinsicht günstige Lösung bietet sich dazu die Verfestigung des Baugrunds durch Injektionen an. Dabei werden hauptsächlich Zement-Bentonit-Suspensionen oder Chemikalien verwendet. Die Anwendungsbereiche der einzelnen Einpreßgüter werden durch die Fließfähigkeit (Viskosität) des Einpreßmittels und die Durchlässigkeit des Baugrundes vorgegeben. So können etwa feinkörnige Lockergesteinsböden mit den billigeren Zement-Bentonit-Suspensionen nicht mehr verpreßt werden, da die Feststoffpartikel, also die Zementkörner während des Verpressvorganges ausgefiltert werden (20, 22). Damit wird ein weiteres Eindringen der Suspension in das Korngerüst verhindert. In solch einem Fall werden als Einpreßmittel Emulsionen oder chemische Lösungen verwendet, deren gering viskose Fließeigenschaften das Verpressen von sehr feinkörnigen Böden gestatten. Anwendungsgrenzen der einzelnen Injektionsmittel sind in der Literatur vielfach in Abhängigkeit vom Kornaufbau und der Durchlässigkeit des Bodens angegeben worden und etwa bei Neumann (30), Cambefort (5) oder Kirsch und Samol (23) zu finden.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird bei chemischen Injektionen wiederum im allgemeinen Silikatgelen der Vorzug gegenüber Kunststoffen gegeben. Dabei wird dem basischen Wasserglas als Reaktiv eine Säure beigegeben, wobei als Neutralisationsprodukt ein Kieselsäure- oder Silikatgel ausgefällt wird. Die Ursprünge dieses Verfahrens gehen auf Jéciorsky (1887) zurück. Joosten (21) griff es 1926 wieder auf, seitdem ist es unter dem Namen Joosten-Verfahren bekannt. Die schlagartige Reaktion zwischen Säureund Wasserglas hatte jedoch viele ausführungstechnische Nachteile, wie etwa das Verpressen beider Komponenten in zwei getrennten Arbeitsvorgängen und eine im allgemeinen geringe Reichweite des Injektionsmittels (19).

Erst durch die Entwicklung von Reaktiven, die in einer zeit- und temperaturabhängigen Reaktion Säure freisetzen, konnten diese Nachteile beseitigt werden. Bei diesen Reaktiven handelt es sich um organische Verbindungen, die im allgemeinen durch die Reaktion mit Wasser Säure freisetzen. Als Sammelbegriff wird für diese Art der Injektion die Bezeichnung "Monudurverfahren" verwendet. Als gebräuchlichste Reaktive seien hier Athylazetat, Formamid, Glyocal und Durcisseur genannt. Die Säure wird progressiv bis zur möglichen vollständigen Neutralisation des Wasserglases freigesetzt. Das Neutralisationsprodukt, das Kieselsäure- oder Silikatgel bewirkt eine Verfestigung oder Verkittung des injizierten Bodens.

Es entsteht damit ein völlig neuer Baustoff, ein Mehrphasensystem, bestehend aus Korngerüst und porenfüllendem Injektionsgut. Sein mechanisches Verhalten wird zum einen durch das zeitabhängige visko-plastische Spannungs-Verformungsverhalten des Gels und zum anderen von den bodenphysikalischen,möglicherweise auch in begrenztem Umfang den bodenchemischen Eigenschaften des Korngerüstes bestimmt. Daraus resultierend zeigen auf der Basis von Wasserglas injizierte Verfestigungskörper unter Dauerbeanspruchung Kriechverformungen. Das zeitabhängige Spannungs-Verformungsverhalten silikatgel-injizierter Korngerüste blieb jedoch bis heute bei erdstatischen Dimensionierungen von Unterfangungskörpern weitgehend unberücksichtigt.

1.1 Derzeitiger Wissensstand und Verfahren

Der Kenntnisstand über das Spannungs-Verformungsverhalten chemisch injizierter Böden ist derzeit noch in der Entwicklung. Trotz intensiver Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet, vor allem in der Bundesrepublik Deutschland, aber auch in den USA und Frankreich hat sich noch kein praktisches Verfahren für die Bestimmung der Festigkeitseigenschaften silikatgel-injizierter Böden herausgebildet.

Grundlage für die Injektionsarbeiten bildet die DIN 4093 (9) "Einpressungen in Untergrund und Bauwerke, Richtlinien für Planung und Ausführung" in der derzeit noch gültigen Ausgabe vom Juni 1962. Unter Abschnitt 7 – Prüfungen – wird dort zur Festigkeit lediglich festgestellt: "Die Festigkeit des behandelten Bereiches wird durch Druckversuche an Ort und Stelle oder im Laboratorium anhand von entnommenen Proben ermittelt". Ober die Art der Druckversuche werden keine näheren Angaben gemacht, insbesondere auf das rheologische Verhalten der im Monudurverfahren verfestigten Böden nicht gesondert hingewiesen.

Als Folge wurden und werden z.T. noch heute die Festigkeitsbestimmungen aller injizierten Böden in Anlehnung an die DIN 1048, Teil 1 (8) "Prüfverfahren für Beton-Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper" durchgeführt, die sich für Zementinjektionen mit den Festigkeitseigenschaften eines Erdbetons zweifellos anbieten. Entsprechend dieser Norm, Ausgabe 1978, Teil 1, Abschnitt 4.2.3 heißt es: "Die Last ist stetig so zu steigern, daß die Druckspannung um etwa 5 N/mm² in der Sekunde zunimmt". Die Probenabmessungen sind die eines Würfels, mit einer Kantenlänge von \geq 15 cm. Dieser Druckversuch ist also ausschließlich durch eine Laststeigerungsrate gekennzeichnet.

In der DIN 18136, Vornorm März 1973 (11) "Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit" heißt es unter Punkt 5 zur Durchführung des Druckversuches: "Bei verkitteten oder stabilisierten Böden, deren Bruchspannung zu weniger als 4 % erwartet wird, ist eine Verformungsgeschwindigkeit von 0,2 % der Probenanfangshöhe in der Minute einzuhalten". Dabei sollen die Proben entsprechend 4.1 (Art und Abmessungen) eine zylindrische bzw. prismatische Form und ein Verhältnis der Höhe zum Durchmesser bzw. zur Kantenlänge von h/d = 2 bis 2,5 aufweisen. Auch dieser Versuch, der durch eine vorgegebene Verformungsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist, berücksichtigt die zeitabhängigen Festigkeitseigenschaften nicht.

Die DIN 18137, Teil 2, Entwurf September 1979 (12) "Baugrunduntersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit, Dreiaxialversuch" enthält erstmals Hinweise, bei der Versuchsdurchführung auf materialspezifische Eigenschaften der Probe zu achten. Unter 6.3.2 (D-Versuch) steht: "Die Stauchungsgeschwindigkeit ist der Bodenart, den Abmessungen der Probe und den Entwässerungsbedingungen im Gerät anzupassen".

In Bezug auf die Dimensionierung von Unterfangungskörpern werden auch heute noch die silikatgel-injizierten Korngerüste, aufbauend auf den Erfahrungen mit zement-injizierten Böden, als "starrer" Baukörper betrachtet. Die Grundlagen

für erdstatische Dimensionierungen chemisch verfestigter Böden gehen auf Kutzner (25) zurück. Kutzners Empfehlungen resultieren auf Versuchen, die ausgehend von Druckversuchen nach DIN 1048, Nachweise der zulässigen Druck-, Schub- und Biegezugspannungen im Verfestigungskörper fordern. Dabei bestimmte er die Schubspannung zu $\tau \approx 0,34 \sigma_{D}$ und die Biegezugspannung zu σ_{R} =0,15 σ_{D} . Schon Kutzner hatte auf die spezifischen Festigkeitseigenschaften chemisch injizierter Böden hingewiesen, insbesondere darauf, daß bei silikatgelinjizierten Korngerüsten im Gegensatz zu zement-injizierten Böden die Festigkeit des Bindemittels wesentlich niedriger als die der Minerale ist. Als Konsequenz forderte er, daß alle Spannungen etwa 1/3 der zu erwartenden und verträglichen Bruchfestigkeit des injizierten Erdkörpers nicht überschreiten. Dies entspricht indirekt der Einführung eines Sicherheitsfaktors von η = 3, also einer Größenordnung, die ansonsten im Bauwesen ohne Parallele ist.

Trotz dieses Sicherheitsfaktors traten bei silikatgel-injizierten Unterfangungskörpern verschiedentlich Schadenfälle auf, die, ohne Kenntnis der rheologischen Eigenschaften chemisch verfestigter Böden, zunächst unerklärlich erschienen.

Erste Hinweise auf das Kriechverhalten silikatgel-injizierter Böden unter Dauerbeanspruchung sind bei Cambefort (5) zu finden. Eine Abhängigkeit der Festigkeit von der Art ihrer Bestimmung wird von Warner (43) aufgezeigt. Er stellte fest, daß die Festigkeit chemisch injizierter Sande von der Belastungsgeschwindigkeit und der Belastungsdauer abhängt, und daß die Tragfähigkeit bei Versuchen mit schnellen Belastungs- bzw. Stauchungsraten erheblich überschätzt wird. Untersuchungen von Hilmer (18), Koenzen (24) sowie Gartung u.a. (15) gehen erstmals auf die Zusammenhänge zwischen Kurzzeit- und Dauerstandsfestigkeit ein.

1.2 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde in einem 1974 beim Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau beantragten und genehmigten Forschungsvorhaben (36) das Festigkeits- und Verformungsverhalten chemisch injizierter Sande systematisch untersucht.

Unter Zugrundelegung dieser Untersuchungen soll mit der vorliegenden Arbeit der Versuch unternommen werden, ein Verfahren zu entwickeln, das sowohl das rheologische Verhalten der chemisch injizierten Böden ausreichend berücksichtigtals auch vom zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand her praxisnah orientiert ist.

In Bezug auf die rheologischen Eigenschaften ist an das Prüfverfahren die Bedingung zu stellen, daß durch die Versuche eine eindeutige Ermittlung der Langzeitfestigkeit ermöglicht wird. Die Langzeitfestigkeit wird dabei als diejenige Festigkeit denifiniert, bei der der Injektionskörper unter einer konstanten Last ein zeitunabhängig stabiles Verhalten aufweist. Gleichzeitig ist eine größte zulässige Verformung der Verpreßkörper zu fordern, die im Einzelfall, abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung, festzulegen ist.

Die Anforderung an das Prüfverfahren, praxisnah orientiert sein zu müssen, engt es sowohl aus zeitlicher, als auch aus wirtschaftlicher Sicht stark ein. Andererseits ist die Wettbewerbsfähigkeit des Einpreßverfahrens letztlich nur dann gegeben, wenn eindeutige Vorhersagen und Nachweise des Injektionserfolges möglich sind. Diese können nur durch ein Prüfverfahren gewährleistet werden, das Aussagen über die zulässigen Gebrauchsspannungen und gleichzeitig wissenschaftlich fundierte Angaben über die vorhandenen Sicherheiten liefert. Dabei sollten die Sicherheitsfaktoren in einer zum übrigen Bauwesen vergleichbaren Größenordnung liegen, was wiederum eine Optimierung der Problemstellung ermöglichen und somit vor allem wirtschaftlichen Gesichtspunkten Rechnung tragen würde.

2. Versuchsanordnung

2.1 Versuchsanlage, Probenherstellung und Probenalter

Systematische Reihenuntersuchungen lassen sich durch die Vielzahl der zu untersuchenden Parameter nur an labormäßig hergestellten Probekörpern durchführen. Durch Probeinjektionen "in situ" kann dagegen nur überprüft werden, ob sich die Ergebnisse der Laborversuche auf die Praxis übertragen lassen. Auch bei technisch einwandfreier Durchführung der Injektionsarbeiten im Felde sind der Obertragbarkeit der Ergebnisse durch die Heterogenität des Untergrundes gewisse Grenzen gesetzt. Die unter Laborbedingungen vorgenommene Prüfung bzw. Vorhersage des Injektionserfolges wird also – ähnlich wie bei üblichen Baugrunduntersuchungen – eine genaue Kenntnis der bodenmechanischen und geologischen Verhältnisse und deren fachlich richtige Einordnung bedürfen.

Für die Herstellung der injizierten Probekörper wurde eine Injektionsanlage gebaut, die die gleichzeitige Herstellung von bis zu 6 Prüfkörpern gestattet (Anlage 1, Bild 1). Die Probekörper weisen in Anlehnung an die DIN 18136 (11) eine zylindrische Form auf, mit einem Durchmesser von d = 10 cm und einer Höhe von h = 26 cm. Auf Anlage 2 ist die Systemskizze eines Injektionszylinders dargestellt. Die Versuchssande werden auf dem Rütteltisch eingebaut, auf dem die Sande - je nach erwünschter Lagerungsdichte - unter einer statischen Auflast verschieden lang eingerüttelt werden. Als Grenzwerte wurden die dichteste und lockerste Lagerung entsprechend DIN 18126 (10) gewählt.

Das Einpreßgut wird – je nach Mischungsverhältnis und Reaktiv – in einem oder mehreren Arbeitsvorgängen aufbereitet (Bild 2), ehe es homogen durchmischt in einen Behälter mit elektrischem Rührwerk eingefüllt wird. Dieses Rührwerk ist mit maximal 4000 Umdrehungen je Minute den hochturbulenten Injektionsmischern (7000 U/min) weitgehend angepaßt.

Die Sande werden mit Hilfe einer Durchströmung des Injektionsbehälters von unten nach oben (Bild 3) verpreßt. Um einen möglichst homogenen Injektionskörper herzustellen, muß auf eine gleichbleibende Einpreßgeschwindigkeit und eine laminare Durchströmung der Proben geachtet werden. Der Einpreßdruck wird also in Abhängigkeit vom jeweiligen Porenvolumen und der Lagerungsdichte der Sande so gewählt, daß die Verpreßdauer konstant bleibt. Die Verpreßdauer wiederum ist der Kippzeit des Injektionsmittels so anzupassen, daß ein Zusetzen der Injektionsleitungen vermieden wird.

Die vorgegebene Einpreßmenge, mit der die Prüfkörper durchströmt werden, entspricht etwa dem 2,5fachen rechnerischen Porenvolumen des zu verpressenden Sandes.

Nach dem Verpressen werden die Prüfkörper in den Probezylindern belassen und nach einer Aushärtungsdauer von 24 Stunden ausgedrückt (Bild 4). Erfahrungsgemäß weisen die Injektionskörper in diesem Alter – je nach verwendetem Reaktiv – ca. 50 bis 70 % ihrer Endfestigkeit auf. Anschließend werden die Injektionskörper noch 6 Tage unter gleichbleibenden Bedingungen gelagert und unmittelbar vor dem Versuch, zur Vermeidung von Randstörungen, oben und

- 8 -

unten um jeweils 3 cm auf insgesamt 20 cm (h/d = 2) abgelängt. Das Prüfalter der Probekörper betrug im allgemeinen 7 Tage und entsprach somit erfahrungsgemäß dem Zeitraum zwischen dem Verpeßdatum und dem Freilegen der Injektionswände in der Praxis. Fallweise ist es jedoch auch möglich, das Prüfalter der Laborproben speziellen Baustellenbedingungen anzupassen. Nach 7 Tagen sind, je nach verwendetem Reaktiv, ca. 85 bis 95 % der Endfestigkeit erreicht (32).

2.2 <u>Versuchsmaterialien</u>
2.2.1 <u>Sande</u>
2.2.1.1 Fein- bis Mittelsande (fmS)

Die Fein- bis Mittelsande wurden im Münchner Raum aus den tertiären Ablagerungen der oberen Süßwassermolasse entnommen. Der Kornaufbau (Anl.3) weist den Tertiärsand als schluffige Fein- bis Mittelsande aus.Sein natürlicher Wassergehalt betrug an der Entnahmestelle w = 6,5 %, die Korndichte ρ_c = 2,6 t/m³.

Die tertiären Sande stehen natürlich gewachsen in sehr dichter Lagerung (D \geq 1,3) an. Diese außergewöhnlich großen Lagerungsdichten sind auf den hohen Anteil von Glimmer und dessen natürliche waagrechte Einregelung zurückzuführen. Die waagrecht ausgerichteten Glimmerplättchen bewirken eine ausgeprägte Querisotropie, wodurch die Sande in waagrechter Richtung eine um ca. eine Zehnerpotenz größere Durchlässigkeit als in senkrechter Richtung aufweisen. Labormäßig hergestellte Proben werden im allgemeinen nur gestört eingebaut. Dies hat zur Folge, daß die waagrechte Ausrichtung des plattigen Glimmers verlorengeht und somit Laborproben aus Tertiärsanden eine im allgemeinen deutlich niedrigere Lagerungsdichte als im natürlich gewachsenen Zustand aufweisen.

Die Abhängigkeit der Dichte des Sandes vom Wassergehalt wurde durch einen modifizierten Proctor-Versuch überprüft und dabei die modifizierte Proctordichte zu mod $\rho_{\rm pr}$ = 1,73 t/m³ und der zugehörige optimale Wassergehalt zu mod w_{pr} = 14,2 % bestimmt.

Die mineralischen Bestandteile des Tertiärsandes lassen sich anhand von Differential-Thermo-Analysen zu nahezu 100 % Quarzanteil bestimmen. Die bindigen Anteile bestehen aus Kalk (Schluffe) sowie Montmorilloniten (Tonminerale), die wiederum überwiegend als Nontronite (Fe) und Beidelite (Al) enthalten sind.

2.2.1.2 Mittel- bis Grobsande (mgS)

Die Mittel- bis Grobsande wurden auf einer Baustelle in Feucht bei Nürnberg entnommen. Entstehungsgeschichtlich sind diese Sande Flugsande, die aus dem Keuper stammen. Bodenmechanisch gesehen handelt es sich um schwach feinsandige Mittel- bis Grobsande (Anl.3), die natürlich gewachsen in mitteldichter bis dichter Lagerung anstehen. An der Entnahmestelle wurde ihr Wassergehalt zu w = 2,7 % und die Korndichte mit ρ_s = 2,67 t/m³ bestimmt.

Der Nürnberger Sand weist für Sande eine vergleichsweise große Durchlässigkeit, großes Porenvolumen und geringe spezifische Kornoberfläche auf. Für die Verpreßtechnik leiten sich daraus erhebliche Probleme ab. Für Zementinjektionen ist sein Porenvolumen auch bei Verwendung feingemahlener Zemente im allgemeinen zu klein. Eine Einpressung auf Silikatgelbasis führt dagegen wegen der geringen spezifischen Kornoberfläche und den daraus resultierenden geringen Adhäsionskräften zwischen Gel und Sandkorn häufig nur zu unzureichenden Verfestigungen.

Die Verdichtbarkeit des Nürnberger Sandes ist vom zugehörigen Wassergehalt weitgehend unabhängig. Ein durchgeführter modifizierter Proctorversuch zeigte, daß unabhängig von der Wasserzugabe die Trockendichte nahezu konstant blieb. Die modifizierte Proctordichte wurde in diesem Versuch mit mod $\rho_{\rm pr}$ = 1,84 t/m³, der zugehörige optimale Wassergehalt mit mod w_{pr} = 4,9 % bestimmt.

Die mineralischen Bestandteile des Nürnberger Sandes sind aufgrund einer qualitativen Untersuchung zu 95 % Quarz, 3 % Feldspat sowie Bestandteilen aus Gneis, Hämatit, Goethit und Kaolin bestimmt worden.

2.2.1.3 Mittelsande (mS)

Die Mittelsande wurden von einem Kieswerk aus Wörth a.d. Isar bezogen. Die Flußsande stammen entstehungsgeschichtlich aus den Kalkalpen, mit einem Hauptbestandteil an Mineralen von Sandsteinen, Mergeln, Dolomiten, Quarzen und Graniten. Durch den weiten Transport wird der Mineralanteil an Sandstein, Mergel und Dolomit weitgehend abgebaut, die verbleibenden Quarz- und Granitbestandteile stark abgeschliffen. Die Flußablagerungen weisen somit zumeist eine runde Kornform auf. Darüber hinaus enthalten die Sande auch tertiäre Beimengungen, also wiederum Quarze, die aus dem südlich liegenden tertiären Hügelland mittransportiert werden.

Die Mittelsande kamen für abschließende vergleichende Untersuchungen zur Verwendung. Sie sollten als Bindeglied zwischen den unterschiedlichen Porenvolumen der Fein- bis Mittelsande und Mittel- bis Grobsande den Nachweis der Obertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Sandarten erbringen. Um eine Kornfraktion aus dem Bereich der Mittelsande sicherzustellen, mußten die Sandanteile mit Durchmessern von > 1,0 mm und < 0,2 mm durch Sieben entfernt (Anl.3) werden.

2.2.2 Chemikalien

Die Sande sind durch Einpreßmittel auf Silikatgelbasis verpreßt worden, wobei dem Wasserglas als Reaktive die unter der handelsüblichen Bezeichnung geführten Chemikalien Durcisseur 600 (fmS) und Durcisseur 1000 (mgS) beigegeben wurden. Die Durcisseurs sind Produkte der Französischen Firma Rhone Poulenc und bestehen aus einer Anzahl Dimethylestern der Glutar-, Adipin- und Bernsteinsäuren, wobei sich lediglich die Anteile der einzelnen Komponenten unterscheiden. Ferner ist das Durcisseur 1000 zusätzlich destilliert.

Nach Angaben des Herstellers besitzen die Durcisseurs folgende Zusammensetzung:

Methylsuccinat	30	-	45	%
Methylglutarat	50	-	65	%
Methyladipat	0	-	10	%
Methylalkohol			5	%
Wasser		(),1	%

```
Für die Herstellung des Einpreßmittels wurde ein handels-
übliches Wasserglas mit einer Dichte von 38° Bé, einem
Molverhältnis von n = SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O = 3,34 und einem Fest-
stoffgehalt von 35 Gew.% verwendet. Als Mischungsver-
hältnisse wurden auf Empfehlung des Herstellers bei
allen Versuchen durchgehend folgende Mischungen verwen-
det:
Fein- bis Mittelsande:
50,7 % Wasserglas
10,2 % Durcisseur 600
39,1 % Wasser
Mittel- bis Grobsande:
70,6 % Wasserglas
11,8 % Durcisseur 1000
0,24 % Teepol C
```

17,36 % Wasser

Das Teepol C dient als Emulgator und soll dazu beitragen, ein rasches Entmischen der Lösung zu verhindern. Durch die Zugabe des Emulgators werden einmolekulare, elektrisch gleich geladene Hüllen um die Tröpfchen des Reaktivs gebildet. Diese Hüllen stoßen sich ab und halten somit die Lösung in Mischung.

Trotz einiger im einzelnen noch später zu diskutierender Nachteile dieser Einpreßmittel (vgl. Kapitel 6), wurde die Verwendung der Durcisseurs als den derzeit marktbeherrschenden Reaktiven für sinnvoll erachtet.

3. Chemismus der Silikatgelbildung

Die Gelbildung der Wasserglas-Durcisseur-Mischungen beruht auf der allmählichen Verseifung des Esters (Reaktiv) im stark alkalischen Milieu des Wasserglases. Im Gegensatz zu der schlagartigen (exothermen) Reaktion zwischen Wasserglas und Kalziumchlorid beim "Joosten-Verfahren" wird bei der Verwendung von Estern eine zeitlich verzögerte Freisetzung von Säuren und somit eine allmähliche Bildung des Kieselsäuregels (Silikatgels) erreicht.

Ester + Wasser Verseifung Veresterung Karbonsäure + Alkohol

Die Gelbildung ist ein vergleichsweise komplizierter chemischer Prozess, für dessen besseres Verständnis zunächst näher auf die Eigenschaften der Natrium-Silikat-Lösung eingegangen werden soll.(33).

Das Wasserglas liegt als wässrige, kolloidale Lösung vor. Nach dem Zusammenschmelzen von Na₂SO₃ mit SiO₂ werden die Alkalisilikate unter hohen Drücken in Wasser gelöst. Die Lösungen werden durch das Molekularverhältnis

$$n = \frac{a \text{ Mol SiO}_2}{b \text{ Mol Na}_2 0}$$

und ihren Trockenextrakt C, d.h. die Konzentration der Ionen in der Lösung gekennzeichnet. Ein Wasserglas mit einem Molekularverhältnis von n = 4 und einem Trockenextrakt von C = 30 g in 100 g Lösung weist beispielsweise ein Gewichtsverhältnis von

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{4 \cdot 60}{62} = 3,87$$

und eine Konzentration von 6,16 g Na_20 und 23,84 g Si0₂ in 100 g Wasserglaslösung auf. Die Lösung wird aus Silikationen gebildet, die vier Siliziumatome enthalten und von 18 Hydroxilgruppen umgeben werden Si₄(OH)₁₈²⁻. Da das Silizium vierwertig ist, erhält man ein zweifach negativ geladenes Ion. Zwischen den Siliziumionen, den Natriumkationen und den Hydroxilanionen herrscht ein Gleichgewichtszustand. Die negative Ladung der Siliziumionen sorgt dafür, daß das Wasserglas in Lösung bleibt, da die abstoßenden Kräfte zunächst noch größer sind als die anziehenden.

Durch die Reaktivzugabe werden bei der Verseifung dieser Ester die Dikarbonsäurensalze freigesetzt. Dies bewirkt zum einen die Neutralisation der Alkalität und zum anderen die Entladung der Siliziumionen, die in Kieselsäure umgewandelt werden. Dieser erste Abschnitt des Gelbildungsprozesses vollzieht sich schlagartig unter Wärmeentwicklung und ohne Zunahme der Viskosität. Im weiteren Prozeß der Gelbildung erfolgt eine Polymerisation der Silikationen und der Kieselsäure zu höher molekularen Silikationen unter gleichzeitiger Zunahme der Viskosität:



Mit der erneuten Bildung von Poly-Silikatsäuren unter Wasserabscheidung (sog. Synäresewasserbildung) wird dieser Prozeß fortgesetzt, bis die Gelbildung wegen einer zu hohen Viskosität oder wegen eines kritischen Molekulargewichts abgeschlossen wird.

Injektionsverfahren, bei denen den verwendeten Wasserglaslösungen Carbonsäurederivate als Reaktive beigegeben werden, liegt als Reaktion jeweils eine zeitverzögerte Hydrolyse des Härters zugrunde. Als Bruttoreaktionsgleichung für die Gelbildung der Kieselsole durch Carbonsäurederivate ergibt sich die folgende, aus der Gelbildungsreaktion und der Hydrolyse des Härters zusammengesetzte Reaktionsgleichung (28):

 $Na_20 \cdot n SiO_2 + 2 R - COR' + H_20 - (SiO_2)_n + 2 R - COO^- + 2 Na^+ + 2 H - R'$ $R = H - , CH_3 - , (CH_2)_m ; m = 2 - 4$ $R' = -OC_2H_5, - OCH_3, - NH_2$

Die in der Mischung enthaltenen Esterkomponenten reagieren mit Wasserglaslösungen nach dem gleichen Prinzip der Gelbildung durch eine irreversible, basenkatalysierte Verseifung der Ester:

 $(CH_2)_m (COOC_xH_y)_2 + H_20 \xrightarrow{OH^-} (CH_2)_m (COO^-)_2 + C_xH_yOH$ m = 2,3,4 x = 1,2 Y = 2x +1

Für die Silikatgelbildung auf der Basis von Wasserglas und Durcisseur ergibt sich somit folgende Summengleichung:

$$Na_20 \cdot n SiO_2 + (CH_2)_m (COOC_XH_y)_2 + H_20 \rightarrow$$

 $(SiO_2)_n + (CH_2)_m (COO^-)_2 + 2 Na^+ + 2 C_XH_yOH_2)_2 + 2 Na^+$

Physikalisch-chemische Messungen (z.B. Viskositätsmessungen, Erstarrungsversuche etc.) legen die Vermutung nahe, daß die Umwandlung vom Sol zum Gel ca. 1 Tag dauert. Danach scheint das Gleichgewicht zwischen dem festen Anteil an Gel und dem flüssigen Anteil an kolloidalem Si₀₂, Salzen und freiem Wasser hergestellt und die mechanischen Eigenschaften des Gels sich nicht mehr zu ändern. In Wirklichkeit verändert sich das Silikatgel jedoch nach Caron (7) noch weiter. Als Folge von der Polykondensation des Silikatgels gibt es noch ca. 2 Monate Synäresewasser ab. Bei großem Wasserüberschuß kann es sogar zu einem gewissen Auflösungsprozess des Gels und zu einer Umkehrreaktion zwischen Gel und Sol kommen.

Die Silikatgelbildung ist also letztlich auf die starke Polykondensationsneigung der Kieselsäuren zurückzuführen, wobei diese jedoch überwiegend von der Wechselwirkung, d.h. Konzentration der einzelnen Mischungskomponenten (Edelmann 1962, (14)) abhängt. Entsprechend unterschiedlich sind daher auch die mechanischen Festigkeiten der Gele einzustufen, die von denjenigen einer rein viskosen Silikatschmelze bis zu denen eines spröden Silikatglases reichen können. Dauerbeständige Silikatgele, d.h. Silikatgele mit entsprechend hohen Festigkeitseigenschaften müssen daher einen vergleichsweise hohen Neutralisationsgrad aufweisen, dem aber durch die Verarbeitbarkeit fallweise unterschiedliche Grenzen gesetzt sind. Zudem beeinflussen eine Menge von Faktoren den Reaktionsablauf, so daß bereits geringe Verschiebungen der Mischungsverhältnisse die Gelbildung entscheidend beeinflussen können (Massenwirkungsgesetz). Als wesentlichste Faktoren, die in der Praxis eine Rolle spielen können, seien Temperatureinflüsse, Wasserhaushalt des zu verpressenden Mediums, aber auch Dosierungsabweichungen angeführt.

4. Versuchsdurchführung und -reihen

4.1 Einflußfaktoren

Durch die Injektion eines Sandes entsteht ein Mehrphasensystem, das hauptsächlich aus Mineralen und dem Injektionsmittel besteht, daneben aber auch Wasser- und Lufteinschlüsse besitzen kann. Das mechanische Verhalten des Injektionskörpers wird zum einen durch die visko-plastischen Spannungs-Verformungseigenschaften des Gels und zum anderen von den bodenphysikalischen Eigenschaften des Korngerüstes und hier vor allem der Lagerungsdichte, der Korngröße sowie dem Reibungsverhalten bestimmt. Mit unterschiedlichen Korngrößen ändert sich die spezifische Oberfläche der Sande, wodurch unmittelbar die Adhäsionskräfte zwischen Mineral und Gel beeinflußt werden.

Sind durch Änderungen der Lagerungsdichte, Kornform und Korngröße des Korngerüstes unmittelbare Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften der injizierten Sande zu erwarten, so dürften Änderungen des Wassergehaltes vornehmlich die Porenverfüllung, bei Wassersättigung oder strömendem Grundwasser möglicherweise auch den Abbindeprozeß sowie die Reichweite der Injektion beeinflussen. Das Wasser wird im Boden auf unterschiedliche Arten gebunden. Bei dem Hauptbestandteil des in den Poren des Bodens gesammelten Wassers handelt es sich um sog. "Kapillarwasser", das bis auf die Kapillarspannung frei beweglich ist. Darüberhinaus kann Wasser im Boden auch als sog. "Porenwinkelwasser" gebunden sein, einem Wasser, das in den Porenwinkeln aufgrund seiner Oberflächenspannung an die Mineraloberfläche gebunden ist. Je nach den örtlichen Druckverhältnissen im Boden, d.h. wirksamem Verpreßdruck und Abstand zur Verpreßstelle, dürfte vor allem die Oberflächenspannung des "Porenwinkelwassers" die Porenverfüllung mit dem Einpreßmittel unmittelbar beeinflussen. Verschiedene Porenverfüllungen dürften aber auch unterschiedliche Festigkeitseigenschaften der injizierten Bödel zur Folge haben.

Eine Beeinflußung der Festigkeitseigenschaften chemisch injizierter Sande durch Temperatureinwirkungen läßt sich aus mehreren Gründen ableiten. Wie bereits im Kapitel 3 beschrieben, kann durch unterschiedliche Temperaturen der Reaktionsablauf bei der Silikatgelbildung entscheidend beeinflußt werden. Dies gilt vor allem in Hinsicht auf die Viksositätsentwicklung des Gels, d.h. veränderte Kippzeiten beim Verseifungsprozeß können den Einpreßerfolg in Hinsicht auf die beabsichtigte Reichweite des zu injizierenden Sandes in Frage stellen. Darüberhinaus sind aber auch der Verarbeitbarkeit der Chemikalien und hier vor allem des Wasserglases bei niedrigen Temperaturen Grenzen gesetzt. Temperatureinflüsse beim Herstellungsprozeß des Gels wurden in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Sie sind im allgemeinen durch Untersuchungen der Hersteller (32) ausreichend abgedeckt. Hinweise auf die Einflüsse der Temperatur auf das fertige Gel sind dagegen in der Literatur nicht zu finden. Dabei ist etwa eine freigelegte Unterfangungswand monatelang erheblichen Temperaturschwankungen ausgesetzt, die in unseren Breitengraden bis zu 40°C betragen können. Der von Caron (7) aufgezeigte Zusammenhang, wonach der Gelbildungsprozeß und somit auch dessen Festigkeitseigenschaften über einen Zeitraum von nahezu 2 Monaten durch Änderungen im Synäresewassergehalt beeinflußt wird, läßt einen Einfluß der Temperatur zumindest nicht.ausschließen.

4.2 Einaxiale Druckversuche

Für eine erste Parameterstudie wurden einaxiale Druckversuche nach DIN 18136 "Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit" (11) durchgeführt. Danach sind verkittete Böden mit einer konstanten Stauchungsgeschwindigkeit von e = 0,2 % je Minute abzudrücken.

In diesen Versuchsreihen wurde der Einfluß der Lagerungsdichte, des Wassergehaltes, der Korngröße sowie der Temperatur auf den injizierten Boden untersucht. In einer zusätzlichen Versuchsreihe wurden einaxiale Druckversuche mit unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten durchgeführt wobei insgesamt 7fach zwischen max i = 7,6 mm je Minute und min i = 0,015 mm je Minute variiert wurde. Bezogen auf die unterschiedlichen Probenanfangshöhen entspricht dies Stauchungsgeschwindigkeiten zwischen e = 3,8 % je Minute und e = 0,0075 % je Minute. Während der Versuchsdurchführung wurde die aufgebrachte Spannung durch einen Ringkraftmesser und die Zusammendrückung der Proben durch eine Meßuhr mit 100stel mm Genauigkeit fortlaufend registriert (Bild 5). Als Versuchsergebnis wird die Bruchspannung q. und Bruchstauchung e_{b} erhalten.

4.3 Einaxiale Retardationsversuche

Zur Bestimmung der Langzeitfestigkeit der injizierten Probekörper wurden die Prüfkörper in eine Belastungsvorrichtung eingebaut, zentrisch über ein Kugelgelenk mit konstanter Last beansprucht und die axiale Verformung an drei Meßuhren mit 100stel mm Genauigkeit registriert (Bild 5). Die Versuchsdauer wurde im allgemeinen aus Zeitgründen auf 7 Tage begrenzt, vereinzelt wurden auch Versuche mit 40 Tagen Dauer durchgeführt. Bei der überwiegenden Anzahl der Versuche wurden die Lasten über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten, in einer zusätzlichen Versuchsreihe wurden die Versuchskörper in gleichbleibenden Zeitabständen mit konstanter Erhöhung der Laststufen bis zum Bruch belastet.

Bei diesen Versuchsreihen wurden wiederum Einflüsse der Dichte, der Korngröße, des Wassergehalts sowie der Temperatur untersucht.

5. Versuchsergebnisse

5.1 <u>Einaxiale Druckversuche</u>

5.1.1 Abhängigkeit von der Dichte

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von der Dichte wurde bei den Fein- bis Mittelsanden die Trockendichte zwischen $\rho_d = 1.60$ und $\rho_d = 1.70$ t/m³ insgesamt dreifach variiert. Alle untersuchten Dichten entsprechen einer Lagerungsdichte von D>0,5. Als Grenzwerte für die Dichte der mit Mittel- bis Grobsanden hergestellten Probekörper wurden dagegen die lockerste (min $\rho_d = 1.47$ t/m³) und dichteste Lagerung (max $\rho_d = 1,83$ t/m³) in Anlehnung an die DIN 18126 (10) zugrunde gelegt. Entsprechend den unterschiedlichen Versuchsbedingungen unterscheiden sich die Ergebnisse der mit den beiden Sandarten verfestigten Proben grundlegend. Bei den injizierten Fein- bis Mittelsanden nimmt die einaxiale Druckfestigkeit mit zunehmender Dichte nahezu linear zu (Anl. 4). Bei den chemisch verfestigten Mittel- bis Grobsanden wurde dagegen bei einer Lagerungsdichte von D = 0,5 die geringste Druckfestigkeit registriert und eine Festigkeitssteigerung sowohl mit zunehmender als auch abnehmender Lagerungsdichte festgestellt (Anl. 5).

5.1.2 Abhängigkeit von der Korngröße

Um den Einfluß der Korngröße auf die Festigkeitseigenschaften chemisch injizierter Sande zu bestimmen, wurden vergleichende Untersuchungen an Probekörpern aus allen drei Sandarten durchgeführt. Diese wurden wechselweise mit Injektionsmischungen auf der Basis von Durcisseur 600 und Durcisseur 1000 verpreßt. Alle Proben wiesen eine mittlere Trockendichte von $d = 1,65 t/m^3$ bei ansonsten konstanten Versuchsparametern auf.

Die Ergebnisse zeigen (Tab.1, Anl.6), daß mit zunehmender Korngröße und größerem Porenvolumen die Druckfestigkeit der silikatgelinjizierten Sande abnimmt. Dies gilt im besonderen für Silikatgele auf der Basis von Durcisseur 600, mit denen die injizierten Mittel- bis Grobsande praktisch nur mehr verkittet werden. Bei Silikatgelen auf der Basis von Durcisseur 1000, die speziell für grobkörnige und somit porenreiche Sande mit geringer spezifischer Kornoberfläche entwickelt wurden, ist dieser Einfluß zwar weniger ausgeprägt, aber immer noch eindeutig feststellbar. Inwieweit die Kornform die Größe der Druckfestigkeit der injizierten Sande beeinflussen kann ist dagegen anhand der vorliegenden Versuche nicht nachweisbar.

5.1.3 Abhängigkeit vom Wassergehalt

Zur Bestimmung des Einflusses des Wassergehaltes der Sande auf die Festigkeitseigenschaften wurden Versuchsserien mit Probekörpern aus Fein- bis Mittelsanden mit Einbauwassergehalten von w=5, 10 und 12% untersucht. Dabei zeigte sich, daß die Injektionskörper mit einem Einbauwassergehalt von w=10 %,trotz der größeren Trockendichte von ρ_d =1,64 t/m³,geringere Druckfestigkeiten aufwiesen als diejenigen, die mit einem Einbauwassergehalt von w=5 % (ρ_d =1,60 t/m³) hergestellt wurden (An1.7).

5.1.4 Abhängigkeit von der Temperatur

Die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von der Temperatur wurde ausschließlich an injizierten Fein- bis Mittelsanden untersucht. Dazu wurden die Probekörper im Alter von 6 Tagen mit Temperaturen zwischen min. 20⁰C (Raumtemperatur) und max. 105⁰C 24 Stunden lang getrocknet, im Anschluß daran ihr Synäresewassergehalt bestimmt und danach die einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136 bestimmt.

Zwar ist durch die Austrocknung der Proben schon bei 30° c eine eindeutige Abminderung des Synäresewassergehaltes zu beobachten (Anl.8), eine deutliche Zunahme der Druckfestigkeit jedoch erst bei Synäresewassergehalten von w_{Sy} <10% festzustellen (Anl.9). Diese Reduzierung des Synäresewassergehaltes von vorher 18 % auf hinterher 10 % entsprach bei dem verwendeten Mischungsverhältnis einer 24stündigen Temperatureinwirkung von 45°C. Auch bei der Sprödigkeit der Proben, die durch das Verhältnis der Bruchfestigkeit zur Bruchstauchung definiert wird, ist eine merkliche Zunahme erst bei Synäresewassergehalten von w_{Sy}=11 % festzustellen (Anl.10).

5.1.5 Abhängigkeit von der Stauchungsgeschwindigkeit

Um die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit chemisch injizierter Sande von der gewählten Stauchungsgeschwindigkeim beim Abdrücken nachzuweisen, wurden an Proben aus Fein- bis Mittelsanden insgesamt 7 Stauchungsgeschwindigkeiten untersucht. Dabei betrugen die Trockendichten zwischen $\rho_d = 1.60$ und 1.70 t/m³, die Einbauwassergehalte wurden wiederum zwischen w = 5, 10 und 12 % variiert.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die ermittelte Druckfestigkeit unmittelbar von der gewählten Stauchungsgeschwindigkeit beim Druckversuch abhängt. Linear aufgetragen ergeben die Ergebnisse eine parabelförmige Kurve (Anl.7), wobei sich die Druckfestigkeit mit zunehmender Stauchungsgeschwindigkeit asymptotisch einem Höchstwert annähert. Das Maximum wird dabei zweifellos ebenso wie das Minimum durch die Versuchsdauer bestimmt, die bei Stauchungsgeschwindigkeiten von $\dot{e} = 3,8$ % der Probenanfangshöhe je Minute ca. 30 Sekunden und bei e = 0,0075 % der Probenanfangshöhe je Minute ca. 5 Stunden beträgt. Größere Stauchungsgeschwindigkeiten lassen ohne automatische Registrierung der aufgebrachten Kraft und der zugehörigen Verformung wegen der durch die Ablesung und Aufschreibung vorgegebenen Pausen im Versuchsablauf eine eindeutige Bestimmung des Maximums nicht mehr zu.

5.2 <u>Einaxiale Retardationsversuche</u>

5.2.1 Abhängigkeit von der Spannung und der Dichte

Analog zu den Versuchsreihen zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit wurde bei den einaxialen Retardationsversuchen die Dichte bei Probekörpern aus Fein- bis Mittelsanden zwischen ρ_d =1,60 und 1,70 t/m³ und bei Proben aus Mittel- bis Grobsanden zwischen ρ_d =1,47 und 1,83 t/m³ variiert. In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften der verwendeten Einpreßmittel wurde bei den chemisch injizierten Fein- bis Mittelsanden (Verpreßmittel Durcisseur 600) der Spannungsbereich zwischen σ_1 = 200 und 600 kN/m² und bei den verfestigten Mittel- bis Grobsanden (Verpreßmittel Durcisseur 1000) der Spannungsbereich zwischen σ_1 = 200 und 1250 kN/m² untersucht.

Generell zeigen die Versuche, daß die axiale Stauchung der Proben im allgemeinen mit steigender Belastung zunimmt (Anl.11 und 12). Vereinzelt wurden jedoch auch bei höheren Laststufen geringere Stauchungen registriert, zudem ergaben sich bei Parallelversuchen häufig stark streuende Ergebnisse (Anl.13 bis 16).

Ferner zeigen die Ergebnisse der einaxialen Retardationsversuche, daß das Spannungs- Verformungsverhalten der Probekörper unmittelbar von der Dichte beeinflußt wird (Anl. 17 und 18). Im Widerspruch zu den von Koenzen (24) aufgezeigten Zusammenhängen, wonach das Spannungs- Verformungsverhalten der Proben linear von der Dichte abhängt, zeigt sich jedoch auch bei den einaxialen Retardationsversuchen, daß dies nur für Lagerungsdichten von D>0,5 gilt.

5.2.2 Abhängigkeit von der Korngröße

Für diese Versuchsserie wurden wiederum Mittelsande mit beiden Einpreßmitteln verpreßt und die Ergebnisse, bei sonst konstanten Versuchsbedingungen mit Retardationsversuchen von Proben aus anderen Sandarten verglichen. Dabei wurden jeweils vier Laststufen im Spannungsbereich zwischen σ_1 =200 und 500 kN/m² untersucht. Die in Tabelle 2 (Anl.19) zusammengestellten Ergebnisse zeigen, daß die axiale Stauchung spannungsabhängig mit zunehmender Korngröße größer wird, das Spannungs- Verformungsverhalten der verfestigten Sande unabhängig vom verwendeten Einpreßmittel also unmittelbar von der Korngröße der Sande abhängt. Dabei zeigen insbesondere die unzureichenden Verfestigungen der mit Durcisseur 600 verpreßten Mittel- bis Grobsande, daß die spezifische Kornoberfläche, die bekanntlich mit zunehmender Korngröße rasch abnimmt, für den Verfestigungserfolg von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche und der Retardationsversuche der silikatgel-injizierten Mittelsande zeigt ferner, daß ein unmittelbarer Rückschluß von der einaxialen Druckfestigkeit auf die Dauerstandsfestigkeit eines injizierten Sandes nicht möglich ist. Bei der Versuchsserie zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (vgl.Tab.1, Anl.6) wurden die höheren Festigkeiten bei den mit Durcisseur 600 verpreßten Mittelsanden verzeichnet. Bei den Retardationsversuchen wurde dagegen das günstigere Spannungs- Verformungsverhalten bei den mit Durcisseur 1000 verfestigten Mittelsanden beobachtet. Wie die Anlagen 20 bis 23 zeigen, ist die axiale Stauchung der mit Durcisseur 1000 verpreßten Sande spannungsabhängig im Mittel nur ca. halb so groß wie die der mit Durcisseur 600 verfestigten Sande, Auch annand der bei den Laststufen von σ_1 =400 und 500 kN/m² im Anschluß an den Belastungsvorgang durchgeführten Entlastungen läßt sich das günstigere Spannungs- Verformungsverhalten der mit Durcisseur 1000 injizierten Sande nachweisen. Danach wurde an diesen Proben (Anl.22) der elastische Anteil an der Gesamtverformung mit ϵ_{n1} =46 % (σ_1 =400 kN/m²) bzw. 50 % (σ_1 =500 kN/m²)
bestimmt. Bei den mit Durcisseur 600 verpreßten Sanden (Anl.23) betrug dagegen der elastische Anteil an der Ge- ' samtverformung nur ϵ_{el} =36 % (σ_l = 400 kN/m²) bzw. 42 % (σ_l =500 kN/m²), d.h. die bleibenden Verformungen dieser Proben sind unabhängig von der Absolutgröße auch prozentual deutlich größer.

5.2.3 Abhängigkeit vom Wassergehalt

Der Einfluß des Einbauwassergehaltes auf die Verformungsund Festigkeitseigenschaften injizierter Probekörper wurde sowohl an chemisch injizierten Fein- bis Mittelsanden als auch an Mittel- bis Grobsanden untersucht. Bei der Versuchsserie mit den Fein- bis Mittelsanden wurden bei nahezu konstanter Trockendichte Proben mit einem Einbauwassergehalt von w=5 % hergestellt und diese mit Proben verglichen, die trocken eingebaut bzw. nach dem trockenen Einbau mit Wasser gesättigt wurden. Die axiale Beanspruchung der Proben betrug jeweils σ_{1F} 200 und 300 kN/m².

Bei der Versuchsserie mit den Mittel- bis Grobsanden wurden Proben mit einem Einbauwassergehalt von w=4 % untersucht und mit Proben verglichen, die trocken eingebaut bzw. nach dem trockenen Einbau gleichfalls wassergesättigt wurden. Bei der Wassersättigung wurde zudem der Einfluß von Leitungswasser im Vergleich zu entlüftetem Wasser untersucht. Bei den Mittel- bis Grobsanden wurden die Langzeitversuche mit konstanten Spannungen von $\sigma_1=200$ und 400 kN/m² durchgeführt.

Unabhängig von der verwendeten Sandart zeigen die Versuchsergebnisse, daß die Verformungseigenschaften der Proben weitgehend von den jeweiligen Einbauwassergehalten abhängen. Bei beiden Sandarten sind an den Proben, die mit einem unterschiedlichen Einbauwassergehalt verpreßt wurden, wesentlich größere Verformungen und Stauchungsraten festgestellt worden, als an den Proben, die trocken eingebaut bzw. nach dem trockenen Einbau wassergesättigt wurden (Anl.24 und 25).

Ferner sind die wesentlichsten Ergebnisse der Versuchsserie mit den Mittel- bis Grobsanden tabellarisch zusammengestellt (Tab.3, Anl.26). Wie diese tabellarische Zusammenstellung zeigt, sind deutliche Unterschiede hinsichtlich der Verformung und Stauchungsrate vor allem bei den Proben mit 4 % Einbauwassergehalt festzustellen. Auch die Silikatgelaufnahme ist in Anbetracht der geringeren Trockendichte und dem daraus resultierenden größeren Porenvolumen nur unbedeutend größer. Bei einem Vergleich des Porenfüllungsgrades zeigt sich, daß dieser bei den trocken eingebauten Proben um im Mittel 11 % höher liegt, als bei den Proben, die mit 4 % Wassergehalt eingebaut wurden. Dagegen differiert der Porenfüllungsgrad bei wassergesättigten Proben und trocken eingebauten Proben nur wenig, im vorliegenden Fall um 2 % (Leitungswasser) bzw. 4 % (entlüftetes Wasser). Diese Tendenzen waren auch bei der Versuchsserie mit den Fein- bis Mittelsanden registriert worden, wobei dort jedoch der Porenfüllungsgrad bei den unterschiedlichen Herstellungsarten bis zu 20 % schwankte (Anl.27). Zudem wurde bei diesen Versuchen ein in Abhängigkeit von den jeweiligen Einbauwassergehalten unterschiedlicher Porenfüllungsgrad festgestellt, wobei bei 10 % Einbauwassergehalt die geringste Silikatgelaufnahme verzeichnet wurde.

5.2.4 Abhängigkeit von der Temperatur

Der Einfluß der Temperatur auf die Langzeitfestigkeit der injizierten Proben wurde ausschließlich an verfestigten Fein- bis Mittelsanden untersucht. Dabei wurde wiederum ausschließlich die Austrockung der Proben untersucht. Der Temperaturbereich wurde zwischen 20 und 50° C variiert, wobei eine 24-stündige Trocknung der Probekörper bei max. 50° C einer Reduzierung des Synäresewassergehaltes von vorher w_{sy} = 19,3 % auf nachher w_{sy} = 7,8 % entsprach.

Die durch die Temperaturen verursachte Reduzierung des Synäresewassergehaltes bewirkt innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs eine geringfügige Erhöhung der Langzeitfestigkeit - Proben ohne entsprechende Vortrocknung gingen bei einer Belastung von $_1 = 500 \text{ kN/m}^2$ ausschließlich zu Bruch - und eine insgesamt vergleichsweise geringere axiale Stauchung gegenüber nicht vorgetrockneten Proben (Anl.28 und 29). Die geringere Gesamtverformung ist ausschließlich auf die anfänglich kleinere Stauchungsrate zurückzuführen. Im Gegensatz zu standfesten Proben mit natürlichem Synäresewassergehalt, bei denen mit zunehmender Versuchsdauer eine stetige Abnahme der Stauchungsraten festzustellen ist (vgl. z.B. Anl.11), ist bei den durch erhöhte Temperaturen vorgetrockneten Proben die Abnahme der Stauchungsrate während der ersten fünf Tage weniger ausgeprägt. Danach nimmt sie auch hier vergleichbar ab, so daß die Stauchungsraten nach einer Woche unabhängig vom Synäresewassergehalt nahezu identisch sind.

5.2.5 Einfluß der Größe der Laststufen auf das Spannungs-Verformungsverhalten der Proben

Der Einfluß der Größe der Laststufen auf das Spannungs-Verformungsverhalten der Proben ist ausschließlich an ver~ festigten Mittel- bis Grobsanden untersucht worden. An 12 Prüfkörpern wurde bei Langzeitversuchen der Einfluß der Laststeigerung auf die Größe der Endverformung und der Stauchungsrate überprüft. Bei allen Probekörpern wurde als Endstufe eine konstante Last von σ_1 = 600 kN/m² angestrebt. Die Laststeigerung erfolgte im 24-Stunden-Rhythmus, wobei die Größe der einzelnen Laststufen bis zum Erreichen der Endlast variiert wurde. Insgesamt wurden in dieser Versuchsserie an ie zwei Vergleichsproben die Lasten auf 6 verschiedene Arten gesteigert. Der Laststeigerung in gleichbleibenden Stufen von 100 kN/m², 150 kN/m^2 , 200 kN/m^2 und 300 kN/m^2 wurden Versuche gegenübergestellt, bei denen die Endbelastung von 600 kN/m² sofort bzw. in zwei Stufen von 500 und 100 kN/m² aufgebracht wurde. Die maximale Prüflast von 600 kN/m² wurde im einzelnen also zwischen ein und sechs Tagen erreicht.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß der Einfluß der Größe der Laststeigerung vergleichsweise gering ist (Anl.30). Abgesehen von den Versuchen, die mit einer Laststeigerung in Stufen von 150 kN/m² durchgeführt wurden, deren Ergebnisse offensichtlich durch eine andere Probenqualität beeinflußt wurden, sind bei allen Proben die axialen Stauchungen nach sieben Tagen zu $\varepsilon_7 = 0,26$ bis 0,39 % bestimmt worden. Bereits nach sieben Tagen ist die Zuordnung der Größe der Endverformung zur Art der Laststeigerung nur noch bedingt möglich. Eine Extrapolation der Versuche über eine längere Zeitdauer läßt zudem erwarten, daß sich die Endverformungen, unabhängig von der Art der Laststeigerung, weitgehend angleichen. Unabhängig davon, ob eine Prüflast sofort oder erst allmählich in Stufen aufgebracht wird, dürfte somit feststehen, daß für die Größe der Verformung allein die Höhe der Prüflast, nicht aber die Belastungsgeschwindigkeit bestimmend ist.

5.3 Wertung der Versuchsergebnisse

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche mit denjenigen der einaxialen Retardationsversuchen zeigt, daß ein unmittelbarer Rückschluß von der Kurzzeitfestigkeit auf die Langzeitfestigkeit nicht möglich ist. Bei den vergleichenden Untersuchungen an den mit beiden Einpreßmitteln verfestigten Mittelsanden wurden die größeren einaxialen Druckfestigkeiten an den mit Durcisseur 600 verpreßten Probekörpern registriert, das günstigere Langzeitfestigkeitsverhalten dagegen an den mit Durcisseur 1000 verfestigten Proben nachgewiesen. Obwohl die Grenzwerte eines stabilen Traqverhaltens bei den Dauerversuchen für beide Einpreßmittel in diesem Fall nicht untersucht wurden, läßt sich aufgrund der bei den übrigen Retardationsversuchen gemachten Beobachtungen feststellen, daß ein unmittelbarer Rückschluß vom Zusammendrückungsverhalten während des Retardationsversuchs auf die erzielbare Langzeitfestigkeit möglich ist. Die bei den Retardationsversuchen gemessenen axialen Stauchungen nach sieben Tagen von $_7$ = 0,39 % bei den mit Durcisseur 1000 verfestigten Probekörpern, im Gegensatz von 7 = 0,64 % bei den mit Durcisseur 600 verpreßten Proben, lassen

auf eine um ca. 60 % größere Langzeitfestigkeit der mit Durcisseur 1000 verpreßten Mittelsande schließen. Die einaxiale Druckfestigkeit der mit Durcisseur 600 verfestigten Mittelsande ($q_u = 3,23 \text{ MN/m}^2$) lagen dagegen um ca. 25 % höher als die der mit Durcisseur 1000 verpreßten Proben ($q_u = 2,55 \text{ MN/m}^2$). Das Verhältnis einaxiale Druckfestigkeit zur Langzeitfestigkeit differiert also für beide Einpreßmittel um nahezu 100 %.

Nach Angaben des Herstellers wurden die Mischungsverhältnisse beider Einpreßmittel in Hinsicht auf eine möglichst hohe Langzeitfestigkeit gewählt. Wie in Kapitel 3 beschrieben, hängt die Langzeitfestigkeit unmittelbar vom Neutralisationsgrad einer Mischung ab. Die fallweise Verwendung unterschiedlicher Wasserglasgualitäten und Reaktive wird also zu entsprechend unterschiedlichen Neutralisationsgraden und somit einem jeweils voneinander abweichenden Größenverhältnis zwischen einaxialer Druckfestigkeit und Langzeitfestigkeit führen. Das Langzeitverhalten chemisch injizierter Sande läßt sich also nicht mit einem herkömmlichen Druckversuch unter gleichzeitiger Berücksichtigung eines einfachen Reduktionsfaktors prüfen, sondern kann hinreichend genau nur durch einaxiale Retardationsversuche, die das Kriechverhalten der Proben berücksichtigen, ermittelt werden.

Als weitere Erkenntnisse der zuvor beschriebenen Reihenuntersuchungen kann festgestellt werden, daß mit Ausnahme des Temperatureinflusses alle untersuchten Parameter das Festigkeitsverhalten der chemisch injizierten Sande nachhaltig beeinflussen. Korngröße und Kornform dürften dabei als wesentlichste Einflußfaktoren zu nennen sein. Mit kleinerem Korndurchmesser nimmt die spezifische Kornoberfläche rasch zu. Ohne Berücksichtigung bodenchemischer Zusammenhänge und somit möglicherweise voneinander abweichenden Adhäsionskräften zwischen Mineralen und Einpreßmitteln nehmen mit kleinerem Korndurchmesser die Kontaktflächen zwischen Einpreßgut und Mineralen zu und, daraus resultierend, sind insgesamt günstigere Festigkeitseigenschaften zu erwarten. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse scheinen diese Feststellungen zwar zu widerlegen, da bei den einaxialen Retardationsversuchen mit den verfestigten Mittel- bis Grobsanden durchwegs günstigere Ergebnisse erzielt wurden, doch sind diese vorwiegend durch die unterschiedliche Qualität der Reaktive zu begründen.

Auch der Wassergehalt der Sande kann je nach deren Wasserhaltevermögen den Verpreßvorgang entscheidend beeinflussen. Die z.B. bei Cambefort (5) vertretene Auffassung, wonach das Wasser durch den Verpreßvorgang restlos verdrängt und durch Injektionsgut ersetzt wird, läßt sich an den unterschiedlichen Porenfüllungsgrade der mit verschiedenen Einbauwassergehalten verpreßten Fein- bis Mittelsande eindeutig widerlegen. Allenfalls bei wassergesättigten Proben wurde im Vergleich zu trocken verpreßten Sanden ein ähnlich hoher Porenfüllungsgrad verzeichnet, wobei jedoch auch bei den trocken verpreßten Sanden eine geringfügig höhere Einpreßgutaufnahme als bei den wassergesättigten verzeichnet wurde. Inwieweit diese Einflüsse auf molekular an der Oberfläche der Minerale gebundenes Wasser oder auf das durch Oberflächenspannung in den Porenzwickeln an den Mineralen haftende

Wasser zurückzuführen ist, kann anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht bestimmt werden. Hier handelt es sich aus chemisch-physikalischer Sicht um sehr komplexe Vorgänge, die die Adhäsionskräfte an den Mineraloberflächen und daraus resultierend auch das Festigkeitsund Verformungsverhalten der injizierten Sande unmittelbar beeinflussen.

6. Fehleranalyse der Versuchsdurchführung

Die wichtigsten Fehlerquellen bei der Durchführung der zuvor beschriebenen Versuche sind sowohl herstellungsals auch meßtechnischer Art.

6.1 Fehlerquellen bei der Probenherstellung

Probleme bei der Probenherstellung in Bezug auf eine gleiche Probenqualität ergaben sich vor allem bei Prüfkörpern, die mit Silikatgelen auf der Basis von Durcisseur 1000 verpreßt wurden. Bei diesen Gelen wurde trotz eines intensiven Durchmischens aller Reaktionskomponenten des öfteren ein frühzeitiges Entmischen des Einpreßmittels beobachtet. Auch die seitens des Herstellers empfohlene Zugabe des Emulgators (vgl. Kapitel 2.2.2) konnte diese Entmischungen nicht immer verhindern, so daß angenommen werden kann, daß zumindest vereinzelt durch Dosierungsabweichungen der erzielte Neutralisationsgrad des Gels und, daraus resultierend, seine Festigkeitseigenschaften von vornherein unterschiedlich waren. Diese im Einzelnen nicht kontrollierbaren Dosierungsabweichungen dürften die naheliegendste Begründung für die immer wieder festzustellenden Abweichungen im Spannungs- Verformungsverhalten der mit Durcisseur 1000 injizierten Probekörper darstellen, die sich vor allem in den großen Streuungen bei Parallelversuchen aber auch in spannungsabhängig unterschiedlichen Verformungsgrößen während der Retardationsversuche dokumentierten. Die Entmischungseffekte bei Einpreßmitteln, die auf der Basis von Durcisseur 1000 hergestellt wurden, sind auch an einer in zwei Instituten durchgeführten Ringanalyse, die die Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung an labormäßig injizierten Probekörpern zum Thema hatte (39), unabhängig voneinander festgestellt worden.

Versuchstechnisch lassen sich diese Dosierungsabweichungen durch Entmischungseffekte allenfalls durch Verwendung höher turbulenter Rührwerke sowie kürzerer Verpreßwege vermeiden. Praxisorientiert dürfte jedoch zumindest die Forderung nach kürzeren Verpreßwegen, d.h. einem kürzeren Abstand zwischen Injektionszentrale und Verpreßort, aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kaum zu verwirklichen sein.

6. 2 Meßtechnische Fehlerquellen

Durch die hohe Anforderung an die Meßgenauigkeit bei einaxialen Retardationsversuchen – die beim Kriechen der injizierten Sande auftretenden Verformungen liegen bereits im allgemeinen nach wenigen Tagen in der Größenordnung von einigen 1000stel Millimeter pro Tag – sind in Bezug auf die Versuchsdurchführung mehrere Anderungen bzw. Verbesserungen erforderlich. Zunächst sollten die Versuchsstände erschütterungsfrei aufgeständert werden. Bei den Kriechversuchen wurden an Wochenend- und Feiertagen grundsätzlich vergleichsweise kleinere Stauchungsraten (Verformung pro Zeiteinheit) als an Werktagen registriert. Gleiches gilt für die Zeitabschnitte während der Nacht, während der ebenfalls geringere Stauchungsraten als während der Arbeitszeit tagsüber beobachtet wurden. Diese Zunahme der Stauchungsraten dürfte ausschließlich auf dynamische Beanspruchungen zurückzuführen sein, die zum einen von institutsinternen Geräten und zum anderen von dem am Institut vorbeiführenden Schwerlastverkehr verursacht wurden. Darüberhinaus ist es auch erforderlich, den Versuchsstand vor Sonneneinwirkungen zu schützen. Insbesondere bei Retardationsversuchen, bei denen während der Versuchsdauer ein völliges Abklingen der Verformungen eintrat, wurden vereinzelt am Versuchsende minimale Hebungen registriert. Diese Hebungen sind am ehesten durch Längenausdehnungen der Meßfühler infolge unterschiedlicher Temperatureinwirkungen zu erklären.

Meßtechnisch gesehen empfiehlt es sich, die Verformungen mit elektronischen Weggebern zu messen. Die auf dem Federprinzip beruhenden Meßuhren sind nur für Verformungsgrößen von \geq 100stel Millimeter geeignet, kleinere Meßgrößen können dagegen nur noch näherungsweise abgeschätzt werden. Elektronische Meßeinrichtungen hätten zudem den Vorteil, daß die Meßwerte öfters abgefragt und gespeichert werden könnten, so daß es auch möglich wäre, während der Nacht und an Wochenend- und Feiertagen ausreichende Meßwertermittlungen sicherzustellen. Durch wiederholte Integration der Wegänderungen über verschiedene Zeiträume ließen sich auch die Veränderungen der Kriechverformungen ständig kontrollieren und somit die auf die unterschiedliche Verformungsmechanik der Sande und Gele (vgl.Kap.8.1) zurückzuführenden Zufälligkeiten ausschalten.

Weitere meßtechnische Fehlerquellen, wie etwa die Ausschaltung der Endflächenreibung zur Vermeidung des Einleitens unkontrollierter Zugkräfte,können dagegen kaum ausgeschaltet werden, soll zur Abschätzung der vorhandenen Sicherheit ein unmittelbarer Vergleich zwischen Proben, die unter Auflast injiziert wurden, mit Proben, die herkömmlich verpreßt wurden, möglich sein (vgl.Kap. 9.2.). Nachdem aus der Sicht der Probenherstellung die Ausschaltung der Endflächenreibung von unter Auflast injizierten Probekörpern unter vertretbarem Aufwand kaum möglich erscheint, dürfte es sinnvoller sein, bei beiden Versuchsdurchführungen eine vergleichbare Fehlerquelle in die Versuche mit einzubeziehen. Ahnliches gilt für eine Abgleichung der Probenoberflächen, die bei den unter Auflast verpreßten Probekörpern gleichfalls nicht möglich ist. Hier läßt sich ein unmittelbarer Vergleich dadurch erzielen, daß bei den Probekörpern, die ohne statische Auflast verpreßt wurden, bei den Retardationsversuchen die Sofortverformung beim Aufbringen der Versuchslast unberücksichtigt bleibt.

7. Kriechverhalten von Böden

7.1 Allgemeine Grundlagen des Kriechverhaltens

Nach Wälzel-Jelinek (42) ist die Kriechverformung eines beliebigen Materials abhängig von Zeit, Spannungszustand, Temperatur und Materialzusammensetzung. In der Kriechforschung wurden vor allem die Haupteinflußfaktoren Zeit und Spannung bzw. der Einfluß der Spannung auf die Kriechfunktion untersucht. Dabei wurde experimentell bestätigt, daß die Kriechverformungen und die Kriechgeschwindigkeit mit dem Anwachsen der Spannungen zunehmen und bei Spannungen, die z.T. erheblich unter der Kurzzeitfestigkeit liegen können, zum Bruch führen.

Die Verformungsmechanik kriechender Böden ist ein äußerst komplexes Thema, das seit den ersten Vorstellungen über die Mechanik der Kriechverformungen von Böden von Terzaghi (40) sich in der Literatur in einer Vielzahl unterschiedlicher, z.T. auch gegensätzlicher Theorien niederschlägt. Als die beiden wesenlichsten, zugleich aber auch unterschiedlichsten Vorstellungen seien hier die Arbeiten von Bjerrum (2) sowie Mitchell u.a. (26) angeführt.

Bjerrum unterscheidet zwischen Reibungskontakten von Mineral zu Mineral und Kohäsionskontakten zwischen Mineral, Wasserhülle und Mineral. Reibungs- und Kohäsionskontakte weisen demnach eine unterschiedliche Steifigkeit und somit auch Lastaufnahmefähigkeit auf. Nach Aufbringen der Last findet eine allmähliche Übertragung der Last von den Kohäsions- zu den Reibungskontakten statt. Solange ein zusätzlicher Reibungswiderstand geweckt werden kann, folgt eine Abnahme der Verformungsgeschwindigkeit. Übersteigt dagegen die Spannungsintensität den mobilisierbaren Reibungswiderstand, muß dieser Spannungsanteil von den kohäsiven Kontakten aufgenommen werden.

Nach Mitchell u.a. wird in einem hauptsächlich interessierenden Spannungsbereich von ca. 25 bis 90 % der maximalen Scherfestigkeit der Verformungswiderstand ausschließlich durch Kontakte der Festteilchen und nicht durch die Viskosität der Wasserhüllen beeinflußt. Dies gilt unabhängig davon, ob der Boden entwässert oder nicht entwässert, trocken oder wassergesättigt, gestört oder ungestört, normal konsolidiert oder Überkonsolidiert ist.

Die Betrachtungsweise von Bjerrum beruht auf der klassischen, ingenieurmäßigen Vorstellung von den beiden Scherwiderstandsanteilen Kohäsion und Reibung, die direkt von der effektiven Normalspannung und dem Wassergehalt abhängen. Mitchell geht dagegen von einer rheologischen Betrachtungsweise aus, wonach die Reibung geschwindigkeits- und temperaturabhängig ist und vom Energiepotential im Bereich der Kornkontakte beeinflußt wird.

Die beiden Theorien differieren somit hauptsächlich im unterschiedlichen Verständnis der Bodenmechanik, die nach mechanistischer Auffassung lediglich das Spannungs-Verformungsverhalten von Böden überprüft, und chemischphysikalische Zusammenhänge als Ursache für das Spannungs-Verformungsverhalten weitgehend ausklammert. Als Folge sind die Kriechfunktionen bzw. Zustandsgleichungen, die auf der Betrachtungsweise von Bjerrum aufbauen, vor allem empirische bzw. halbempirische Ansätze. Die von Mitchell u.a. aufgestellte Kriechfunktion basiert dagegen auf der "rate process theory", einer theoretischen Gleichung für das Energieptential, die ursprünglich für die Gaskinematik von Glasstone u.a. (17) entwickelt wurde.

Als weitere Möglichkeit der mathematischen Formulierung von Kriechvorgängen bieten sich sog. "rheologische Modelle" an. Die Aufstellung rheologischer Modelle erlaubt im allgemeinen eine gute Beschreibung der Kriechvorgänge, ohne auf die physikalischen Zusammenhänge beim Kriechen eingehen zu müssen. Die phänomenologische Betrachtungsweise ermöglicht es durch die Einführung beliebiger neuer Modellelemente sich jedem Kriechvorgang anzupassen. Zudem können Erfahrungen bei der Erstellung von Modellgesetzen anderer Stoffe herangezogen werden. Vorteilhaft ist die Anschaulichkeit der rheologischen Modelle. Sie erlauben etwa eine Differenzierung nach sofortigen und verzögerten elastischen Verformungsanteilen sowie auch nach plastischen und viskosen Anteilen. Nachteilig ist der hohe mathematische und experimentelle Aufwand bei komplizierten Modellkombinationen, so daß rheologische Modelle vor allen Dingen für die praxisorientierte Anwendung zu aufwendig sein dürften. Dennoch finden sich rheologische Modelle für das Kriechverhalten silikatgel-injizierter Sande u.a. bei Koenzen (27), Richter und Müller-Kirchenbauer (34) sowie Gartung (16).

Empirische bzw. halbempirische Ansätze für Kriechfunktonen finden sich in der Literatur u.a. bei Singh und Mitchell (37), Scott (35) sowie Vyalov (41). Von Stetzler (38) wurde die Zustandsgleichung von Vyalov, die für gefrorene Böden entwickelt wurde, auf das Kriechverhalten silikatgel-injizierter Sande übertragen. Nachteilig wirkt sich jedoch auch bei diesem Verfahren der hohe experimentelle Aufwand aus.

7.2 Kriechfunktion nach Singh und Mitchell

Bei der Auswertung von Kriechversuchen stellten Singh und Mitchell (37) fest, daß zischen dem Logarithmus der Stauchungsrate log e und dem Logarithmus der Zeit log t ein lineares Verhältnis besteht. Diese Zusammenhänge wurden von Singh und Mitchell nicht nur an eigenen Versuchen, sondern auch an Kriechversuchen von Muramaya (29), Gampanella und Vaid (6) sowie 8ishop (1) nachgewiesen.



Abb.1: Kriechversuche undrainierter Osaka-Tone

Wie ein typisches Beispiel dieser ausgewerteten Kriechversuche (Abb.1) zeigt, gilt diese Beziehung unabhängig von der Kriechspannung, wobei unterschiedliche Spannungen lediglich zu einer Parallelverschiebung der Geraden führen. Der Gültigkeitsbereich für diese lineare Funktion zwischen log e und log t wurde von Singh und Mitchell zwischen etwa 25 und 90 % der Spannungsintensität D_o angegeben (Abb.2), dürfte aber fallweise vom Kriechpotential der Böden abhängen.



Abb.2: Gültigkeitsbereich der Kriechfunktion (schematisch)

Auf Abb.3 sind zwei schematische Kriechkurven im ϵ/t -Diagramm aufgetragen.



Abb.3: Schematischer Verlauf zweier Kriechkurven

Die Kurve 1 zeigt einen Kriechversuch, bei dem wegen der zu hohen Spannungsintensität der Kriechbruch eintritt. Die Kurve 2 zeigt dagegen den Verlauf einer sich stabilisierenden Kriechverformung, d.h. eine mit zunehmender Zeit ständig abnehmende Kriechgeschwindigkeit. Anhand der Kurve 1 läßt sich das Kriechen nach Singh und Mitchell schematisch durch drei verschiedene Verhaltensweisen beschreiben:

Im Abschnitt I nimmt die Stauchungsrate ab, dieser Bereich wird als primäres Kriechen bezeichnet. Im Abschnitt II ist die Stauchungsrate konstant (sekundäres Kriechen). Im Abschnitt III nimmt die Stauchungsrate zu (tertiäres Kriechen) und führt anschließend zum Kriechbruch.

Voraussetzung für eine sich stabilisierende Kriechverformung entsprechend der Definition nach Singh und Mitchell ist somit die Bedingung, daß mit zunehmender Versuchsdauer die Stauchungsrate ständig abnimmt. Nur unter dieser Voraussetzung kann von einer nahezu linearen Proportionalität zwischen dem Logarithmus der Stauchungsrate und dem Logarithmus der Zeit ausgegangen werden. Diese Gesetzmäßigkeit gilt bei Kriechversuchen, wie oben bereits angeführt, für den überwiegenden, mittleren Spannungsbereich. In diesem Spannungsbereich wurde von Singh und Mitchell auch eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Logarithmus der Stauchungsrate log e und der Spannungsintensität D, nachgewiesen (Abb.4).



Abb.4: Undrainierter Versuch eines gestört eingebauten Illits

Ausgehend von diesen Beziehungen wurde von Singh und Mitchell für die Kriechfunktion ein allgemein gültiger Potenzsatz formuliert, der die Linearität zwischen log é und log t einerseits sowie log é und D_o andererseits berücksichtigt:

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot e^{\alpha D} o \cdot (-\frac{t_1}{t})^m$$

```
Darin bedeuten:

\dot{\epsilon} : Stauchungsrate

A : A = \dot{\epsilon} bei t<sub>1</sub> = 1 und D<sub>o</sub> = 0 (fiktiver Wert entsprechend

Abb.2)

e : Basis der natürlichen Logarithmen

\alpha : Neigung der Geraden im log \dot{\epsilon}/D_{o}-Diagramm

D<sub>o</sub>: Spannungsintensität

m : Neigung der Geraden im log \dot{\epsilon}/\log t-Diagramm, nach

Singh und Mitchell auch als "Kriechpotential" definiert.
```

Die Werte m, e und A müssen experimentell bestimmt werden, der Gültigkeitsbereich der Kriechfunktion erstreckt sich nur auf den in Abb.2 dargestellten mittleren Spannungsbereich.

8. Kriechverhalten silikatgel-injizierter Sande

8.1 Obertragbarkeit der Kriechfunktion von Singh und Mitchell auf das Kriechverhalten silikatgel-injizierter Sande

Eine Überprüfung des Kriechverhaltens der silikatgelinjizierten Sande in Bezug auf die von Singh und Mitchell aufgezeigten Gesetzmäßigkeiten bietet sich am ehesten für die mit Durcisseur 1000 verfestigten Mittel- bis Grobsande an. Nur bei diesen Versuchsserien wurden Retardationsversuche mit ausreichender Versuchsdauer von bis zu 40 Tagen durchgeführt, die den gesamten Spannungsbereich vom frühen Abklingen der Kriechverformungen bis zum Bruch nach langanhaltenden Kriechverformungen umfassen. Dieser Spannungsbereich wurde zwar auch bei den Versuchsserien mit den chemisch verfestigten Fein- bis Mittelsanden erfaßt, diese Versuche jedoch grundsätzlich auf sieben Tage begrenzt. Zudem war bei diesen Retardationsversuchen die Festigkeitsspanne zwischen stabilem Tragverhalten – also einer über die gesamte Versuchsdauer abnehmenden Stauchungsrate – sowie instabilem Tragverhalten, d.h. zunächst konstanter Stauchungsrate mit anschließendem Kriechbruch, zu klein, um diese Zusammenhänge exakt überprüfen zu können. Auch die Versuchsreihen mit den chemisch injizierten Mittelsanden sind für diese Überprüfung nicht geeignet. Bei dieser Versuchsserie wurde neben der gleichfalls generell zu kurzen Versuchsdauer von sieben Tagen an allen Probekörpern ein stabiles Spannungs- Verformungsverhalten nachgewiesen.

Eine erste Überprüfung inwieweit die von Singh und Mitchell aufgestellten Gesetzmäßigkeiten auch für das Kriechen silikatgel-injizierter Sande Gültigkeit besitzen, dürfte somit am zweckmäßigsten an den chemisch verfestigten Mittel- bis Grobsanden durchgeführt werden.

Eine Auswertung dieser 40-tägigen einaxialen Retardationsversuche zeigt Anl.31. Auf dieser Anlage wurde für unterschiedliche Spannungen die Stauchungsrate in Abhängigkeit von der Zeit im doppellogarithmischen Maßstab dargestellt. Aufgrund dieser Darstellung kann für die Spannungsstufen von $\sigma_1 = 200$ bis 500 kN/m² innerhalb eines Zeitraumes zwischen etwa 25 bis 30 und 300 bis 600 Stunden eine lineare Abhängigkeit zwischen log $\dot{\varepsilon}$ und logt angenommen werden. Bis zu einer Versuchsdauer von ca. 25 bis 30 Stunden ist eine zeitabhängig überproportionale Zunahme, nach ca. 300 bis 600 Stunden eine zeitabhängig überproportinale Abnahme der Stauchungsraten zu beobachten. Die überproportionale Abnahme der Stauchungsraten weist auf eine Beendigung des Kriechvorganges und somit die Stabilisierung der Proben hin. Bei der Spannungsstufe von $\sigma_1 = 1000 \text{ kN/m}^2$ ist dagegen nach ca. 30 Stunden innerhalb des untersuchten Zeitraumes das Kriechpotential m konstant, so daß bei dieser Spannungsstufe erst durch eine entsprechende Verlängerung der Versuchsdauer bestimmt werden könnte, ob diese Probe ein stabiles oder instabiles Verhalten aufweist. Alle Geraden sind parallel,d.h. das Kriechpotential m ist im gesamten untersuchten Spannungsbereich konstant, wobei jedoch eine direkte Abhängigkeit der Größe der Stauchungsrate von der Spannung bei dieser Versuchsserie nicht festgestellt werden konnte.

Bei den auf der Anlage 32 ausgewerteten Versuchsergebnissen handelt es sich gleichfalls um 40-Tage-Versuche, die sich generell durch die geringere Dichte bei sonst unveränderten Parametern von der zuvor diskutierten Versuchsreihe unterscheiden. Diese geringere Dichte bewirkt zwar größere Stauchungsraten; es kann jedoch auch bei dieser Versuchsserie von einem in dem zuvor abgegrenzten Zeitraum konstanten Kriechpotential ausgegangen werden. Eine Ausnahme bildet lediglich eine der beiden, mit einer Spannungsstufe von $\sigma_1 = 1000 \text{ kN/m}^2$ durchgeführten Versuche. Bei diesem Versuch wurde von Versuchsbeginn an, eine im Vergleich zu den übrigen Versuchen ständig überproportionale Zunahme der Stauchungsraten beobachtet, die schließlich nach ca. 400 Stunden zum Bruch der Probe führte. Zusammenfassend zeigt die Auswertung aller 40-Tage-Versuche, daß die von Singh und Mitchell aufgezeigte Gesetzmäßigkeit, wonach bei Böden mit Kriecheigenschaften zwischen dem Logarithmus der Zeit und dem Logarithmus der Stauchungsrate in einem mittleren Spannungsbereich eine lineare Beziehung besteht, auch für silikatgel-injizierte Sande hinreichend genau zutrifft. Es erscheint somit zulässig, die aus den Versuchen resultierenden Werte in diesen Diagrammen durch Geraden zu verbinden.

Die von den Geraden festgestellten Abweichungen dürften vornehmlich durch die Verformungsmechanik der Sande zu erklären sein. Durch die Auswertung von Triaxialversuchen wurde von Brinch Hansen und Lundgren (4) nachgewiesen, daß Schubformänderungen von Sanden z.T. aus Gleitungen an den Kontaktflächen und z.T. aus Plattdrückungen der einzelnen Körner an den Berührungspunkten resultieren. Die Plattdrückungen, die als elastische Formänderungen anzusehen sind, bilden eine im Vergleich zu den Gleitungen, die als plastische Formänderungen bezeichnet werden müssen, kleinere Verformungsgröße. Aber auch die durch Gleitungen verursachte Relativbewegung zweier Körner ist normalerweise sehr klein, so daß sich zwei Nachbarkörner nur im Ausnahmefall "passieren". Erst bei einem Spannungszustand nahe des Bruchs wird eine wesentliche Anzahl der Körner so weit gleiten, daß sie ihre Nachbarkörner passieren.

Bei Beginn eines Druckversuches können die Kräfte, die zwischen zwei Sandkörnern in den Berührungspunkten übertragen werden, näherungsweise durch die in Abb.5 abgebildeten Kontaktkräfte wiedergegeben werden:



Abb.5: Kräfte zwischen zwei Sandkörnern (nach Brinch Hansen u.Lundgren)

Diese Kontaktkräfte sind proportional zu σ_3 , ihre Kraftrichtung weicht nur wenig von der Normalen zur Berührungsfläche ab. Die Steigerung der senkrecht wirkenden Spannungen σ_1 - σ_3 bewirkt demnach eine Veränderung der Kraftrichtung der Kontaktkräfte. Durch diese Drehung werden die Reibungskräfte aktiviert und bei zunehmender axialer Belastung die durch den inneren Reibungswinkel der Sande begrenzten Kontaktkräfte an immer mehr Berührungsflächen überschritten. Die Folge sind Gleitungen, die von Brinch Hansen und Lundgren als primäre Gleitungen klassifiziert werden.

Nachdem diese primären Gleitungen spannungsabhängig sind, dürften zu Beginn eines Druckversuches nahezu keine plastischen Formänderungen (Gleitungen) auftreten. Versuche zeigen jedoch, daß diese bereits am Anfang nachweisbar sind. Ursache dieser Gleitungen sind die zuvor diskutierten Plattdrückungen der Körner in den BerUhrungspunkten. Wegen der im allgemeinen unregelmäßigen Sandstruktur bewirken diese PlattdrÜckungen wiederum gewisse Relativverschiebungen der Körner, die von Brinch Hansen und Lundgren als "sekundäre Gleitungen" bezeichnet werden.

Sande erfahren somit im Triaxialversuch plastische Formänderungen, die sowohl reibungs- als auch spannungsabhängig sind.

....

Obertragen auf Druckversuche mit silikatgel-injizierten Sanden vergrößern die Silikatgele zunächst durch die Verkittung der Sandkörner die Kontakt- bzw. Reibungskräfte des Sandgerüsts. Aufgrund der visko-plastischen Eigenschaften der Gele können die zuvor beschriebenen Gleitungen der Sande jedoch nicht verhindert, sondern allenfalls größere Relativverschiebungen des Korngerüstes mit der Folge eines Bruchs vermieden werden. Teilweise dürften also unterschiedliche Kontaktkräfte an den Berührungspunkten der Sandkörner die Größe der zulässigen Spannung eines injizierten Sandes bestimmen. Dabei werden die Kontaktkräfte durch unterschiedliche Adhäsionskräfte zwischen Sandkorn und Gel, aber auch unterschiedliche Porenfüllungsgrade bestimmt.

Die in den log c/log t-Diagrammen festgestellten Abweichungen von einer idealisierenden Geraden lassen sich überwiegend durch die Verformungsmechanik der Sande begründen, wobei jedoch offensichtlich die visko-plastischen Kriecheigenschaften des Gels überwiegen, so daß über größere Zeiträume gesehen das Spannungs-Verformungsverhalten silikatgel-injizierter Sande durch das Kriechverhalten der Gele bestimmt wird.

Auf den Anl.33 bis 42 wurden alle im Rahmen der Untersuchungen durchgeführten einaxialen Retardationsversuche in Bezug auf die Kriechfunktion von Singh und Mitchell ausgewertet. Trotz einer zeitlichen Begrenzung dieser Versuche auf sieben Tage, läßt sich feststellen, daß unabhängig von der verwendeten Sandart, den Lagerungsdichten, den Wassergehalten und auch den verwendeten

Reaktiven bei allen Versuchen die Gesetzmäßigkeiten von Singh und Mitchell näherungsweise eingehalten werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Borden u.a. (3). Insbesondere bei den mit Durcisseur 600 verpreßten Feinbis Mittelsanden sind jedoch die Stauchungsraten der Probekörper mit Ausnahme der trocken eingebauten bzw. wassergesättigten Proben (Anl.38 bzw. 40 bis 42) insgesamt so groß, daß bei der überwiegenden Zahl der geprüften Probekörper die Versuchsdauer nicht ausreicht, um eine Aussage bezüglich des Stabilitätsverhaltens zu machen. So läßt sich auch der zackenförmige Verlauf einzelner Proben im log $\dot{\epsilon}$ /log t-Diagramm (Anl.41, 42) nicht mehr durch die zuvor beschriebene Verformungsmechanik der injizierten Sande erklären. Bei diesen Proben muß vielmehr bereits von mikroskopischen, vereinzelt auch makroskopischen Bruchvorgängen ausgegangen werden, wobei jedoch die visko-plastischen Eigenschaften des Gels Sprödbrüche verhindern. Insbesondere im Grenzbereich zwischen stabilem und instabilem Spannungs-Verformungsverhalten muß somit von zeitlich lang dauernden Bruchvorgängen (vgl. auch 40-Tage-Versuch mit $\sigma_1 = 1000 \text{ kN/m}^2$ Anl. 32) ausgegangen werden.

8.2 Mathematische Erfassung des Kriechens silikatgel-injizierter Sande

8.2.1 Nach Singh und Mitchell

Die von Singh und Mitchell aufgestellte Kriechfunktion zur rechnerischen Erfassung der Kriechverformungen setzt eine logarithmisch lineare Beziehung zwischen Spannung und Stauchungsrate (vgl. Abb.1, S.40) voraus. Diese Voraussetzungen werden, wie in Kapitel 6.1 diskutiert, von den verwendeten Einpreßmitteln häufig nicht erfüllt, so daß sich eine zeitabhängige lineare Funktion zwischen der Spannungsintensität D_o und dem Logarithmus der Stauchungsrateloge auch bei Auswahl der günstigsten Versuchsergebnisse nur bedingt ableiten läßt (Anl.43).

Am Beispiel der Versuchsserie der mit Durcisseur 1000 verpreßten Mittelsande sollen diese Zusammenhänge exemplarisch aufgezeigt werden. Bei dieser Versuchsserie wurde zwar grundsätzlich eine spannungsabhängige Zunahme der Stauchungsraten festgestellt, eine zeitabhängige lineare Beziehung zwischen der Spannungsintensität und dem Logarithmus der Stauchungsrate kann jedoch allenfalls nach einer Versuchsdauer von 36 Stunden zugrunde gelegt werden (Anl.44 bis 46). Da bei allen Spannungen Parallelversuche durchgeführt wurden, lassen sich - je nach Auswahl der Einzelversuche - beliebige Kriechfunktionen ableiten. In der Tabelle 4 (Anl. 47) sind die Kriechfunktionen in Abhängigkeit von den jeweiligen Versuchsergebnissen der Einzelproben zusammen-gestellt und den tatsächlichen Versuchswerten gegenübergestellt. Dabei differieren die rechnerischen von den im Versuch ermittelten Werten fallweise erheblich. Die rechnerische Erfassung des Kriechens silikatgel-injizierter Sande nach dem von Singh und Mitchell vorgeschlagenen Verfahren erscheint daher wenig erfolgversprechend.

8.2.2 Delogarithmierung des log e/log t-Diagramms

In einem linearen x,y-Koordinatensystem kann eine Gerade durch die Gleichung

$$y = k_1 \cdot x + k_2 (\underline{1})$$

dargestellt werden (Abb.6).



Abb.6: Gerade im x-y-Diagramm

Abb.7: Gerade im Funktionsnetz

In einem beliebigen Funktionsnetz, mit den Funktionen

$$x = a = l_1 \cdot f(u) (2)$$

und $y = b = l_2 \cdot g(v) (3)$

wird die Gerade durch folgende Funktion (Abb.7) dargestellt:

 $l_2 \cdot g(v) = k_1 \cdot l_1 \cdot f(u) + k_2 (4)$

Anstelle eines beliebigen Funktionsnetzes wird unter Verwendung eines doppellogarithmischen Funktionsnetzes mit

 $a = 1 \cdot \log u (5)$ und $b = 1 \cdot \log v (6)$ eine Gerade durch die Funktion

 $1 \cdot \log v = k_1 \cdot 1 \cdot \log u + k_2 (7)$

dargestellt.

Ersetzt man in Gleichung (7) die Konstante k_2 durch 1 · log v_o und teilt Gleichung (7) durch 1 erhält man:

 $\log v = k_1 \cdot \log u + \log v_0$ (8)

und Gleichung (8) entlogarithmiert ergibt:

$$v = v_0 \cdot u^{k1} (9)$$

Je nach Vorzeichen von k₁, also negativer oder positiver Steigung der Geraden im doppellogarithmischen Funktionsnetz, stellt die Gleichung (<u>9</u>) die Funktion einer Parabel oder Hyperbel dar.

Obertragen auf das log ἐ/log t-Diagramm läßt sich Gleichung (9) durch die Formel

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{(1)} \cdot t^{\mathsf{m}} (\underline{10})$$

ausdrücken, d.h. die über die einaxialen Retardationsversuche erhaltenen Kriechfunktionen entsprechen aufgrund des negativen Vorzeichens von m im linearen Funktionsnetz einer hyperbolischen Funktion.

Zur Bestimmung dieser Funktion ist es zunächst erforderlich, die Steigung der in einem mittleren Spannungsbereich in dem zuvor abgegrenzten Zeitraum durchwegs parallelen Geraden zu ermitteln. Dazu wurden nochmals alle durchgeführten einaxialen Retardationsversuche aufgetragen (Anl.48 bis 59). Aus diesen Darstellungen ist ersichtlich, daß unabhängig von der Art des Einpreßmittels sowie Art, Lagerungsdichte und Wassergehalt der verwendeten Sande die Steigung der Geraden bei stabilem Verhalten hinreichend genau mit m = -1 (tg α = 135⁰) angenommen werden kann.

Die Gleichung der Kriechfunktion (<u>10</u>) reduziert sich somit auf die Beziehung

 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{(1)} \cdot t^{-1} (\underline{11})$ $bzw. \quad \dot{\epsilon} \cdot t = \dot{\epsilon}_{(1)} (\underline{12})$

also die Gleichung einer gleichseitigen Hyperbel. In Gleichung (<u>12</u>) entspricht $\dot{\epsilon}_{(1)}$ einer fiktiven Stauchungsrate z.Z. t = 1 (Anl.60), die den Schnittpunkt der Geraden im log $\dot{\epsilon}/\log$ t-Diagramm mit der Ordinate bildet. Die Konstante $\dot{\epsilon} \cdot$ t wird im folgenden als dimensionsloses "Kriechmaß" eingeführt.

Auf den Anlagen 61 bis 69 sind, basierend auf dieser Kriechfunktion, Auftragungen von Versuchswerten den rechnerisch ermittelten Werten gegenübergestellt. Ferner wurde auf den Anlagen 70 bis 75 das "Kriechmaß" in Abhängigkeit von der Zeit im linearen Maßstab aufgetragen. Beide Darstellungsarten zeigen, daß bei der überwiegenden Anzahl der Versuche Rechen- und Versuchswerte gut übereinstimmen.

Dagegen weisen Proben, deren Spannungs-Verformungsverhalten bereits im log $\epsilon/\log t$ -Diagramm von einer Geraden abweichen, zumeist ein instabiles Verhalten auf. Bei diesen Versuchen ist mit zunehmender Versuchsdauer sowohl ein Anwachsen der Stauchungsraten (vgl. Anl.68 und 69) als auch des "Kriechmaßes" (vgl. Anl.70, 71 und 73) zu beobachten. Beide Phänomene kündigen den baldigen Bruch der Probe an, d.h. ein ab ca. 25 Stunden über die gesamte Versuchsdauer konstantes "Kriechmaß" ist als erstes entscheidendes Stabilitätskriterium zu werten. Unter Zugrundelegung aller in der vorliegenden Arbeit ausgewerteten Versuche ergibt sich, daß, unabhängig von dem verwendeten Einpreßmittel, sowie auch der Art, der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt der Sande, alle Probekörper mit einem "Kriechmaß" von $\dot{\epsilon}$ • t < 0.12 ein auf Dauer stabiles Verhalten aufweisen. Dieser rein empirisch festgelegte Wert ist mit Sicherheit kein Absolutmaß für ein Stabilitätskriterium. Er bedarf zudem noch einer eingehenden Überprüfung mit anderen Einpreßmitteln. Er kann aber, nachdem in diesen Versuchen die wesentlichsten Parameter varijert worden sind, als ein erster, hinreichend begründeter Anhaltspunkt für eine Stabilitätsaussage dienen.

Nachdem die in Kap.8.1 beschriebene Verformungsmechanik der injizierten Sande jedoch infolge örtlich begrenzter Umlagerungen des Korngerüstes grundsätzlich Abweichungen von den theoretisch ermittelten Beziehungen erwarten lassen, sollte zumindest im Grenzbereich zwischen stabilem und instabilem Verhalten der eindeutige Nachweis eines über den zuvor abgegrenzten Zeitraum konstanten "Kriechmaßes" erbracht werden. Dabei kann die Einführung des "gleitenden Mittels", also der ständig neuerlichen Mittelwertbildung aufeinanderfolgender Versuchswerte (vgl. Anl.75 und 76) zur zusätzlichen Klärung dienen. Sollte auch dieses Verfahren keinen eindeutigen Nachweis eines dauerhaft konstanten "Kriechmaßes" erbringen, müßte die Versuchsdauer so lange verlängert werden, bis eindeutig feststeht, ob die Probe dem stabilen oder instabilen Bereich zuzuordnen ist.

9. Sicherheitsreserven und Versagenswahrscheinlichkeit

Eine echte Sicherheitsanalyse im Sinne einer deterministischen oder stochastischen Sicherheitsbetrachtung setzt Reihenuntersuchungen zur Bestimmung der Einflüsse der Einzelparameter sowie die Kenntnis der fallweise zugehörigen Bruchspannungen voraus. Beide Voraussetzungen sind im vorliegenden Fall nicht gegeben und dürften auch in der näheren Zukunft vermutlich aus Zeitgründen ausscheiden. Anhand von stichprobenartigen Überprüfungen wurde jedoch der Versuch unternommen, qualitative Aussagen in Bezug auf die vorhandenen Sicherheiten zu erhalten. Darüberhinaus erscheint es aufgrund einer statistisch ausreichenden Anzahl von Versuchen als zulässig, für die mit Durcisseur 1000 verpreßten Mittel- bis Grobsande, unter Vernachlässigung des Einflusses der Einzelparameter, den Versuch zu unternehmen, die "a-priori"-Versagenswahrscheinlichkeit der injizierten Sande bei Kriechversuchen zu bestimmen.

9.1 Vergleich Labor- und Baustellenbedingungen

Eine Gegenüberstellung von Verpreßarbeiten unter Baustellen- und Laborbedingungen zeigt, daß einige, ganz wesentliche Unterschiede vorhanden sind. Dies gilt sowohl in Hinsicht auf die Verpreßarbeiten selbst, als auch in Bezug auf die spätere Beanspruchung der durch Injektion verfestigten Böden.

Verpreßarbeiten im Felde werden grundsätzlich nur unter einer Auflast, die beim Verpressen als Druckwiderlager dient, durchgeführt. Diese Auflasten resultieren aus Gebäudelasten oder aus Oberlagerungsspannungen aus dem Eigengewicht des Bodens. Ist dieses Druckwiderlager nicht vorhanden, wird es durch eine abgewandelte Verpreßtechnik, wobei der Boden von "oben nach unten" anstelle von "unten nach oben" verpreßt wird, zunächst künstlich hergestellt.

Beim Verpressen injizierter Probekörper im Labor fehlt dagegen dieses Druckwiderlager. Die Probe wird von unten nach oben laminar mit dem Einpreßmittel durchströmt. Das geringe Eigengewicht der Probe liegt dabei deutlich unter dem Verpreßdruck, so daß während des Einpressens Entspannungen im Korngefüge auftreten. Diese können im Extremfall bei sehr lockeren Lagerungsdichten zu einer Verflüssigung der Sande ("soil liquifaction") und daraus resultierend, zu Kornumlagerungen in eine dichtere Lagerung führen (36). Dadurch unterscheiden sich die unter Labor- und Baustellenbedingungen verpreßten Sande sowohl in der Art der Verkittung durch das Einpreßmittel als auch im Reibungsverhalten des Korngerüstes ganz entscheidend. In Bezug auf die Beanspruchung sind im allgemeinen ebenfalls unterschiedliche Voraussetzungen gegeben. Die Kriechversuche im Labor wurden ausschließlich im einaxialen Spannungszustand durchgeführt, in der Praxis kann dagegen in der Regel von dreiaxialen (z.B. Fundamentvergrößerung) oder zumindest biaxialen Spannungszuständen (z.B. Gebäudeunterfangung) ausgegangen werden. Nur im Ausnahmefall, etwa bei der Tieferführung eines Einzelfundaments und gleichzeitiger, allseitiger Freilegung des Injektionskörpers wäre somit von nahezu identischen Spannungszuständen auszugehen.

Um diese hauptsächlichen Unterschiede zwischen Laborund Baustellenbedingungen qualitativ zu erfassen, wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

9.2 Einfluß des Spannungszustands beim Verpressen

Für diese Versuchsserie wurde ein Gerät entwickelt (Bild 7), das es ermöglicht, die Sande unmittelbar in der Belastungseinrichtung unter der späteren Prüflast zu verpressen. Dem Injektionsdruck wirkt somit die Gebrauchsspannung entgegen, so daß eine Entspannung des Korngerüsts beim Verpressen vermieden wird. Die Aushärtung des Prüfkörpers erfolgt im Probenbehälter, mit Beginn der einaxialen Retardationsversuche werden die Seitenteile entfernt (Bild 8). Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen mit zwei verschiedenen Lagerungsdichten sowie einem jeweils konstanten Verpreßdruck durchgeführt. Dabei wurden je Versuchsserie 3 bzw. 4 Spannungsbereiche untersucht und jeweils 2 herkömmlich, ohne Auflast verpreßte Proben mit einem unter Auflast injizierten Probekörper verglichen.

Die Ergebnisse der Retardationsversuche zeigen ganz generell, daß die unter Auflast verpreßten Proben (An1.77 und 78) wesentlich geringere Verformungen und daraus resultierend, auch wesentlich kleinere Stauchungsraten als die herkömmlich injizierten Probekörper (Anl.17 und 18) erleiden. Auf diesen Anlagen sind die Verformungen in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen, wobei bei den Kriechkurven der herkömmlich verpreßten Proben, die beim Aufbringen der Last auftretenden Sofortverformungen nicht berücksichtigt wurden, so daß ein unmittelbarer Vergleich beider unter unterschiedlichen Bedingungen verpreßten Probenarten möglich ist. Auf Anlage 79 sind die Stauchungsraten in Abhängigkeit von der Zeit im doppellogarithmischen Maßstab dargestellt. Dabei zeigt sich, daß auch für die unter Auflast verpreßten Probekörper die in Kap.8.1 aufgezeigte Gesetzmäßigkeit einer linearen Beziehung zwischen dem Logarithmus der Stauchungsrate und dem Logarithmus der Zeit, bei gleichzeitig konstantem "Kriechmaß", in dem zuvor abgegrenzten Zeitraum eingehalten wird. Die Größe des "Kriechmaßes" unterscheidet sich jedoch bei den unterschiedlich verpreßten Probenarten mit zunehmender Spannung immer mehr (vgl. Anl.80 und 81), d.h. an Verpreßkörpern "in situ" ist gegenüber labormäßig hergestellten Proben mit deutlich geringeren Verformungen und somit einem wesentlich kleineren "Kriechmaß" zu rechnen.

Eine quantitative Angabe eines sich aus den unterschiedlichen "Kriechmaßen" ableitenden Sicherheitsfaktors ist anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht möglich. Zunächst müßte wegen der unterschiedlichen Art der Verkittung durch Versuche belegt werden, inwieweit für die unter Auflast verpreßten Proben dasselbe Stabilitätskriterium für das "Kriechmaß" wie für die herkömmlich verpreßten Laborproben zugrundegelegt werden kann. Ferner dürfte fallweise das Verhältnis der Prüfspannung zum Injektionsdruck die Art der Verkittung und somit auch die Größe der Verformung und des "Kriechmaßes" beeinflussen. Letztlich können die unter Auflast verpreßten Laborproben auch nicht unmittelbar mit den unter Baustellenbedingungen verpreßten Injektionskörpern verglichen werden. Bei den unter Auflast durchgeführten Laborversuchen wird der Probe während des Verpressens durch die unnachgiebigen Behälterwände – vergleichbar etwa zum Kompressionsversuch – ein "ödometrischer", also einaxialer Verformungszustand aufgezwungen, wie er sich in der Natur nur bei weit ausgedehnten Schichten einstellt.

Trotz einiger noch offen bleibender Fragen kann jedoch zweifelsfrei festgestellt werden, daß bei der Festlegung der zulässigen Gebrauchsspannung über Laborversuche eine gegenüber den Baustellenbedingungen fallweise unterschiedliche, aber näherungsweise prüfbare Sicherheit in Bezug auf das unterschiedliche Spannungs-Verformungsverhalten vorhanden ist.

9.3 Einfluß des Seitendrucks, dreiaxiale Retardationsversuche

Zur Bestimmung des Einflusses des Seitendrucks auf das Langzeit-Spannungs-Verformungsverhalten silikatgel-injizierter Sande wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Prüflasten im Triaxialgerät durchgeführt. Bei beiden Versuchsserien wurde der Seitendruck insgesamt dreifach variiert, so daß sich bei der ersten Versuchsreihe ein Verhältnis der Hauptspannungen zwischen $\sigma_1/\sigma_{2,3}$ = 3, 4.3 und 7.5 und bei der zweiten Versuchsreihe ein solches von σ_1/σ_2 = 6, 8.6 und 15 ergab. Auf den Anlagen 82 und 83 sind die Ergebnisse der dreiaxialen Retardationsversuche als Kriechkurven dargestellt. Bei der Auftragung der Stauchungsraten in Abhängigkeit von der Zeit im doppellogarithmischem Maßstab (Anl.84 und 85) zeigt sich, daß nur bei zwei der sechs untersuchten Proben von einer über die gesamte Versuchsdauer linearen Beziehung ausgegangen werden kann. Nur die Ergebnisse dieser beiden dreiaxialen Retardationsversuche ließen sich im linearen Maßstab gleichfalls als hyperbolische Funktion (Anl.86) darstellen, wobei es sich jedoch nicht mehr um eine gleichseitige Hyperbel (m⁺-1) handelt.

Bei den vier restlichen Versuchen ist dagegen über die gesamte Versuchsdauer kein einheitliches Kriechverhalten festgestellt worden. Allen Versuchen ist jedoch gemeinsam, daß spätestens ab einer Versuchsdauer von 60 Stunden gegenüber den einaxialen Retardationsversuchen eine größere Abnahme der Stauchungsraten verzeichnet wurde. Damit nimmt auch das "Kriechmaß" ab, d.h. die Seitendrücke bewirken ein früheres Abklingen der Verformungen
und somit auch ein zeitlich verkürztes Kriechen. Aus der Darstellung der Anl.87, auf der die Versuchsergebnisse einaxialer und dreiaxialer Retardationsversuche im doppellogarithmischen Maßstab aufgetragen wurden, geht dies deutlich hervor.

Die geringe Anzahl der Versuche, die uneinheitlichen Versuchsergebnisse sowie auch die fallweise unterschiedlichen, teils bi- und teils triaxialen Spannungszustände "in-situ" lassen auch bei der Bestimmung des Einflusses der Seitendrücke keine allgemeingültige numerische Angabe von Sicherheitsfaktoren zu. Generell ist jedoch festzustellen, daß bei allen untersuchten Proben nach einer Versuchsdauer von t ≥ 60 Stunden eine gegenüber den einaxialen Retardationsversuchen überproportionale Abnahme der Stauchungsrate registriert wurde. Dabei dürfte die Größe der Abnahme der Stauchungsrate eine Funktion der Hauptspannungsverhältnisse darstellen.

9.4 "a-priori"-Versagenswahrscheinlichkeit

Für die mit Durcisseur 1000 verpreßten Mittel- bis Grobsande liegen, ohne Berücksichtigung des Einflusses der Einzelparameter, wie etwa Lagerungsdichte, Einbauwassergehalt oder Versuchsdauer, die Ergebnisse von insgesamt 64 einaxialen Retardationsversuchen vor. Diese Probenanzahl ermöglichte eś, für diese Materialien die Versagenswanrscheinlichkeit im voraus zu bestimmen. Als Grenzkriterium zwischen stabilem und instabilem Verhalten der Proben wurde das in Kap.8.2.2 empirisch eingeführte "Kriechmaß" von $\dot{\varepsilon} \cdot t < 0,12$ zugrundegelegt. Anlage 88 zeigt die Zusammenstellung aller Versuchsergebnisse, wobei die Anzahl der instabilen Probekörper im Verhältnis zu der Gesamtzahl der untersuchten Proben jeweils spannungsabhängig dargestellt wurde.

Für die Bestimmung der "a-priori"-Versagenswahrscheinlichkeit liegen somit zwei grundsätzlich verschiedene Informationen vor. Zunächst ist nur bekannt, ob bei einer bestimmten Belastung von den Proben das Stabilitätskriterium eingehalten wurde oder nicht. Wegen der fehlenden Kenntnis der zugehörigen Bruchspannungen ist es dagegen nicht möglich,eine Aussage dazu zu machen, ob im Falle der Instabilität die Probe nicht bereits bei einer geringeren Belastung ein gleichfalls instabiles Verhalten aufgewiesen hätte. Annliches gilt für die Proben, die das Stabilitätskriterium eingehalten haben. Hier ist ebenso wenig bekannt, ob diese Proben nicht auch noch bei einer höheren Spannungsstufe das Stabilitätskriterium erfüllt hätten. Insofern führt die Auswertung der Versuche - je nach Betrachtungsweise - zu unterschiedlichen Ergebnissen. Auf Anlage 89 sind für beide Fälle die sich aus den unterschiedlichen Betrachtungsweisen ergebenden Funktionen aufgetragen und die zugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben.

Beide Funktionen isoliert betrachtet ergeben also entweder zu günstige oder zu ungünstige Werte. Dabei erscheint es naheliegend, daß mit zunehmender Spannung die Information basierend auf dem instabilen Spannungs-Verformungsverhalten und bei kleineren Spannungen die Information auf der Basis eines stabilen Spannungs-Verformungsverhalten zutreffendere Aussagen für die Versagenswahrscheinlichkeit liefern. Die Verknüpfung beider Informationen,bei einer gleichzeitigen spannungsabhängigen Wichtung der Funktionen dürfte somit zu der realistischen Abschätzung der Werte führen. Eine Funktion, die diese Bedingungen erfüllt, ist ebenfalls auf Anlage 89 dargestellt. Dabei wurde für die spannungsabhängige Wichtung der beiden Funktionen die Gesamtzahl der untersuchten Laststufen zugrundegelegt.

Die Ergebnisse können zwar sowohl wegen der unterschiedlichen Versuchsanzahlen je Spannungsstufe als auch wegen der mehr zufälligen Wahl der niedrigsten und höchsten Prüfspannung nicht als Absolutgrößen gewertet werden, dürften aber bei einer ersten Abschätzung für eine zulässige Gebrauchsspannung wertvolle Hinweise für eine Dimensionierungsgrundlage liefern.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Aus der Praxis ist bekannt, daß silikatgel-verfestigte Böden unter Dauerbeanspruchung z.T. erhebliche Kriechverformungen erleiden können. Bisher wurde diesen Tatbeständen vor allem durch die Einführung erhöhter Sicherheitsfaktoren Rechnung getragen, ohne daß sich daraus näherungsweise abzuschätzende oder sogar quantifizierbare Sicherheiten hätten ableiten lassen. Moderne Anforderungen an Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Bauelementen setzen in Bezug auf die Dimensionierung injizierter Erdkörper sowohl die Kenntnis als auch die Prüfbarkeit des zeitabhängigen Spannungs-Verformungsverhaltens silikatgel-verfestigter Böden voraus.

In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, für chemisch verfestigte Böden ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe sich vergleichsweise einfache Stabilitätskriterien festlegen lassen. Aufbauend auf der von Singh und Mitchell für Kriechvorgänge von Böden allgemeingültig formulierten Kriechfunktion, werden die materialspezifischen Eigenschaften silikatgel-injizierter Korngerüste in einaxialen Retardationsversuchen von max. 40 Tagen Versuchsdauer untersucht und ausgewertet. Dabei zeigt sich, daß das Kriechen silikatgel-injizierter Sande unter Dauerbeanspruchung bei stabilem Verhalten schon nach ca. 1 Tag durch die einfache Funktion $\dot{\epsilon}_{(1)} = \dot{\epsilon} \cdot t$ hinreichend genau beschrieben werden kann. Diese Funktion entspricht im linearen Maßstab einer gleichseitigen Hyperbel, im doppellogarithmischen Maßstab wird sie durch eine Gerade mit einer Steigung von 135⁰ (m=-1) dargestellt.

Diese Funktion sagt aus, daß das Produkt aus Stauchungsrate ϵ und Zeit t während eines Zeitraums zwischen ca. 25 und 30 und 300 bis 600 Stunden zu jedem beliebigem Zeitraum konstant ist. Da diese Konstante $\epsilon_{(1)}$ unmittelbar als Stabilitätskriterium zu werten ist, wird sie vom Autor als "Kriechmaß" bezeichnet.

Auf der Basis aller in dieser Arbeit ausgewerteten Versuche könnten silikatgel-injizierte Sande, die im einaxialen Retardationsversuch ein "Kriechmaß" von $\dot{\epsilon}_{(1)} \leq 0,12$ aufweisen als stabil eingestuft werden, d.h. für diese Proben ist auf Dauer von einem Abklingen der Kriechverformungen auszugehen.

Zunächst sollte die Zulässigkeit dieses Stabilitätskriteriums eingehend an Proben, die mit einem Einpreßmittel unter Verwendung anderer organischer Reaktive injiziert wurden, überprüft werden. Vorläufig dürfte dieses Stabilitätskriterium in Anbetracht der vorhandenen Sicherheiten, die in Bezug auf das unterschiedliche Spannungs-Verformungsverhalten von labormäßig und "in-situ" hergestellten Injektionskörpern nachgewiesen wurden, eine wertvolle Hilfe für erste Bemessungsgrundlagen liefern.

Langfristig gesehen erscheint es möglich, die Versuchsdauer der Retardationsversuche wesentlich kürzer zu wählen, wobei ein Zeitraum von zwei bis drei Tagen als durchaus realistisch erscheint. Dies setzt allerdings eine meßtechnische Versuchsausstattung voraus, die es ermöglicht, das "Kriechmaß" während des Versuchs automatisch zu registrieren und zufällige Streuungen einzelner Meßwerte auszuschalten. Literaturverzeichnis

- Bishop, A.W. (1966): The strength of soils as engineering materials, Geotechnique, Bd.16 S.91 -128
- (2) Bjerrum, L. (1973): Problems of soil mechanics and construction of soft clays and structural unstable soils, General Report, ICSMFE(8), Bd.3 S.111-159
- (3) Borden, R.H., Krizek, R.J., Baker, W.H. (1982): Creep behaviour of silicate grouted sand, Proceedings of the ASCE Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans
- (4) Brinch Hansen, J., Lundgren, H. (1960): Hauptprobleme der Bodenmechanik, Springer-Verlag, Berlin
- (5) Cambefort, H. (1969): Bodeninjektionstechnik, Bauverlag Wiesbaden
- (6) Campanella, R.G., Vaid, Y.P. (1974): Triaxial and plain strain creep rupture of an undisturbed clay, CGT, Bd.11, Nr.1
- (7) Caron, M.C. (1965): Consolidation des sables par injection de gel de silice, Extrait des annales de l'institut technique du batiment et des travaux publics, Nr.213, Paris
- (8) DIN 1048, Teil 1 (1978): Prüfverfahren für Beton, Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper
- (9) DIN 4093 (1962): Grundbau, Einpressungen in Untergrund und Bauwerke, Richtlinien für Planung und Ausführung
- (10) DIN 18 126 (Vornorm 1981): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung

- (11) DIN 18 136 (Vornorm 1973): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit
- (12) DIN 18 137, Teil 2 (Vornorm 1983): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit, Dreiaxialversuch
- (13) Eckhardt, H. (1979): Tragverhalten gefrorener Erdkörper, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 61
- (14) Edelmann, K. (1962): Lehrbuch der Kolloidchemie, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- (15) Gartung, E., Bauernfeind, P. (1976): Grundsatzversuche mit Silikatgelinjektion im Nürnberger Sand, Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern, Heft 29, Eigenverlag LGA Nürnberg
- (16) Gartung, E., Dubois, J., Bauernfeind, P. (1976): Theoretische Untersuchungen über das geomechanische Verhalten silikatgel-injizierter Bodenkörper beim Schildtunnelbau, Heft 30, Eigenverlag LGA Nürnberg
- (17) Glasstone, S., Laidler, K.J., Eyring, H. (1941): The theory of rate process, Mc Graw Hill-Book Co., New York, S.477 ff
- (18) Hilmer, K. (1975): Anwendung der chemischen Bodenverfestigung bei Unterfangungen, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern, Heft 27, Eigenverlag LGA Nürnberg
- (19) Jähde, H. (1953): Injektionen zur Verbesserung von Baugrund und Bauwerk, VEB Verlag Technik,Berlin
- (20) Jessberger, H.L. (1969): Erkundung des Baugrundes für EinpreBarbeiten, VDI-Zeitschrift Bd.111, Nr.8, S.540-547
- (21) Joosten, H. (1953): Das Joosten-Verfahren, Selbstverlag, Haarlem, Holland

- (22) Kaiser, W. (1969): Die technologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen und die daraus ableitbaren Folgerungen für die Praxis im Tiefbau, Dissertation Universität Stuttgart
- (23) Kirsch, K., Samol, H. (1978): Injektionsverfahren zur Baugrundverbesserung, Tiefbau/Ingenieurbau/Straßenbau, H.12, S.919 ff
- (24) Koenzen, J.P. (1975): Rheologische Eigenschaften silikatgel-injizierter Korngerüste, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 64
- (25) Kutzner, C. (1968): Über die mechanischen Eigenschaften der mit Silikatgelen injizierter Erdstoffe, Die Bautechnik, Heft 3, S.86-97
- (26) Mitchell, J.K., Campanella, R.G., Singh, A. (1968): Soil creep as a rate process, ASCE, Vol 94, SM 1, S.231-253
- (27) Müller-Kirchenbauer, H. (1979): Spannungsverformungsverhalten von silikatinjizierten Böden unter Dauerlast, Vorträge der Baugrundtagung 1978 in Berlin, DGEG Essen, S.183-197
- (28) Müller-Kirchenbauer, H., Savidis, S.A. (1982): Grundwasserbeeinflussung durch Silikatgelinjektionen, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 11
- (29) Muramaya, S. (1969): Stress-strain-time behaviour of soils subjected to deviator stress, ICSMFE (7), Mexico 1969, Bd.1, S.297-305
- (30) Neumann, H. (1965): Unterfangung von Gebäuden durch chemische Bodenverfestigung, Der Tiefbau, Heft 1
- (31) Rhone-Poulenc-Chemie-Fine (ohne Jahr): Quelques propriétés des gels de silicate utilisés en consolidation des sols, ohne Ortsangabe
- (32) Rhone-Progil (ohne Jahr): Durcisseurs Firmenprodukt, ohne Ortsangabe

- (33) Richard, C., Solberg, P. (1975): Baugrundverfestigung mit Natriumwasserglasgelen, Tiefbau/ Ingenieurbau/Straßenbau, Heft 9, S.594 ff u. Heft 12, S.826 ff
- (34) Richter, T., Müller-Kirchenbauer, H. (1978): Berechnungen von zeitabhängigen Verschiebungen und Spannungen unter Verwendung eines visko-plastischen Stoffgesetzes mit der Methode der Finiten Elemente, Die Bautechnik, Heft 8/78
- (35) Scott, R. (1969): Stress-deformation and strength characteristics,ICSMFE (7), Mexiko, State of the art volume, S.1-48
- (36) Schubert, A., Jelinek, R. (1979): Überprüfung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften chemisch injizierter Unterfangungskörper, Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
- (37) Singh, A., Mitchell, J.K. (1968): General stressstrain-time function for soils, ASCE, Bd.94, SM 1, S.21-46
- (38) Stetzler, B. (1981): Retardationsverhalten von silikatgel-verfestigtem Sand im einaxialen Druckversuch, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 87
- (39) Stetzler, B., Schubert, A. (1981): Vergleichende Retardationsversuche mit silikatgel-verfestigten Sanden. Die Geotechnik Heft 1, S.34 ff
- (40) Terzaghi, K. (1931): The static rigidity of plastic clays, Journal of Rheology, Bd.2, Nr.3
- (41) Vyalov, S. (1963): Rheology of Frozen Soils, Proc. NAS NRC, Int. Permafrost Conference, Purdue Universität Lafayette, Indiana
- (42) Wälzel, E., Jelinek, R. (1977): Eine Analyse der Kriechprobleme in Lockergesteinen, Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr
- (43) Warner, J. (1972): Strength properties of chemically solified soils, ASCE Soil Mechanics and Foundations Division

Verzeichnis der Bildanlage

Bild	1	Ansicht der Injektionsanlage zur serienmäßigen
		Herstellung von Probekörpern
Bild	2	Aufbereitung des Einpreßmittels in getrennten
		Rührwerken
Bild	3	Durchströmung der Injektionsbehälter mit dem Ein-
		preßmittel
Bild	4	Ausdrücken der erhärteten Probe aus dem Injek-
		tionsbehälter
Bild	5	Einaxialer Druckversuch
Bild	6	Einaxiale Retardationsversuche
Bild	7	Verpressen der Sande unter statischer Auflast im
		Belastungsgerät
Bild	8	Entfernen der Seitenteile nach der Aushärtung der
		Probe

Verzeichnis der Anlagen

А	1	Schemaskizze der Injektionsanlage
А	2	Vertikalschnitt durch einen Injektionszylinder
		(Systemskizze)
А	3	Körnungskurven der Versuchssande
А	4	Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von der
		Dichte, Versuchsserie fmS
А	5	Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von der
		Dichte, Versuchsserie mgS
А	6	Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von der
		Korngröße, tabellarische Zusammenstellung
А	7	Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von der
		Stauchungsgeschwindigkeit
А	8	Abhängigkeit des Synäresewassergehaltes von der
		Temperatur
А	9	Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom
		Synäresewassergehalt
А	10	Abhängigkeit der Probensprödigkeit vom Synärese-
		wassergehalt
А	11	Einaxiale Retardationsversuche, 7-Tage-Versuche,
		Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Span-
		nung, Versuchsserie fmS
А	12	Einaxiale Retardationsversuche, 7-Tage-Versuche,
		Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Span-
		nung, Versuchsserie mgS
А	13	Einaxiale Retardationsversuche,40-Tage-Versuche,
		Abhängigkeit der axialen Stauchung von der
		Spannung, Versuchsserie mgS, Trockendichte
		$\rho_{d} = 1.70 \text{ t/m}^{3}$
		-

A 14 Einaxiale Retardationsversuche, 40-Tage-Versuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung vom Wassergehalt und von der Spannung, Versuchsserie mgS, Trockendichte $\rho_d = 1.70 \text{ t/m}^3$ A 15 Einaxiale Retardationsversuche, 40-Tage-Versuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Spannung, Versuchsserie mgS, Trockendichte ρ_d≈1.75t/m³ A 16 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung vom Wassergehalt und von der Dichte, Versuchsserie fmS Einaxiale Retardationsversuche, 7-Tage-Versuche, A 17 Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Spannung, Versuchsserie mgS, Trockendichte ρ_{A} =1.83 t/m³ A 18 Einaxiale Retardationsversuche, 7-Tage-Versuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Spannung, Versuchsserie mgS, Trockendichte $\rho_{d}\text{=}$ 1.66 t/m 3 A 19 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit des Spannungs-Verformungsverhaltens von der Korngröße, tabellarische Zusammenstellung A 20 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Spannung, Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 600 A 21 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Spannung, Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 1000 A 22 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Spannung, Versuchsserie mS. Einpreßmittel Durcisseur 600, Probenentlastung nach 7 Tagen

- A 23 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Spannung, Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 1000, Probenentlastung nach 7 Tagen
- A 24 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung vom Wassergehalt, Versuchsserie fmS, σ_1 = 200 kN/m^2
- A 25 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung vom Wassergehalt, Versuchsserie fmS, σ_1 = 300 kN/m²
- A 26 Einaxiale Retardationsversuche, 7-Tage-Versuche, Abhängigkeit der Verformungseigenschaften vom Wassergehalt, Versuchsserie mgS, tabellarische Zusammenfassung
- A 27 Abhängigkeit des Porenfüllungsgrades vom Wassergehalt und der Dichte
- A 28 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Temperatur, Versuchsserie fmS, σ_1 = 250 kN/m²
- A 29 Einaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung von der Temperatur, Versuchsserie fmS, σ_1 = 500 kN/m²
- A 30 Zeit-Setzungs-Kurven, Aufbringen der Prüfspannung in verschiedenen Laststufen
- A 31 log $\dot{\epsilon}/\log$ t-Diagramm, Versuchsserie mgS, 40-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.75 t/m^3
- A 32 log $\dot{\epsilon}/\log$ t-Diagramm, Versuchsserie mgS, 40-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.70 t/m³
- A 33 log $\dot{\epsilon}/\log$ t-Diagramm, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.45 t/m³

- A 34 log \dot{e}/\log t-Diagramm, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.55 t/m^3
- A 35 log $\dot{\epsilon}/\log$ t-Diagramm, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.80 t/m³
- A 36 log ε/log t-Diagramm, Versuchsserie mS, Einpreβmittel Durcisseur 600
- A 37 log έ/log t-Diagramm, Versuchsserie mS, Einpreβmittel Durcisseur 10D0
- A 38 log $\dot{\epsilon}$ /log t-Diagramm, Versuchsserie fmS, Variation der Dichte
- A 39 log $\dot{\epsilon}$ /log t-Diagramm, Versuchsserie fmS, Sande trocken und wassergesättigt eingebaut
- A 40 log $\dot{\epsilon}$ /log t-Diagramm, Versuchsserie fmS, Variation des Wassergehaltes
- A 41 log ɛ/log t-Diagramm, Versuchsserie fmS, Variation des Wassergehaltes
- A 42 log c/log t-Diagramm, Versuchsserie fmS, Variaton des Wassergehaltes
- A 43 log $\dot{\epsilon}/D_{o}$ -Diagramm, Versuchsserie mgS
- A 44 log ϵ/D_{e} -Diagramm, Versuchsserie mS, Probenserie 1
- A 45 log $\dot{\epsilon}/D_0$ -Diagramm, Versuchsserie mS, Probenserie 2
- A 46 log $\dot{\epsilon}/D_{o}$ -Diagramm, Versuchsserie mS, Mittelwertbildung
- A 47 Vergleich zwischen den rechnerisch nach Singh und Mitchell sowie im Versuch ermittelten Stauchungsraten, tabellarische Zusammenfassung
- A 48 Ersatz der Kriechkurven im log $\epsilon/\log t$ -Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1 (tg α = 135⁰) Versuchsserie mgS, 40-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.75 t/m³

- A 49 Ersatz der Kriechkurven im log ϵ /log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie mgS, 40-Tage-Versuche mit ρ_{d} = 1.70 t/m³
- A 50 Ersatz der Kriechkurven im log $\dot{\epsilon}$ /log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.45 t/m³
- A 51 Ersatz der Kriechkurven im log $\dot{\epsilon}/log$ t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.55 t/m³
- A 52 Ersatz der Kriechkurven im log ϵ /log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit ρ_d = 1.80 t/m³
- A 53 Ersatz der Kriechkurven im log ε/log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie mS, Einpreβmittel Durcisseur 600
- A 54 Ersatz der Kriechkurven im log e/log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 1000
- A 55 Ersatz der Kriechkurven im log $\dot{\epsilon}/\log$ t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie fmS, Variation der Dichte
- A 56 Ersatz der Kriechkurven im log ϵ /log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie fmS, Sande trocken und wassergesättig eingebaut
- A 57 Ersatz der Kriechkurven im log $\dot{\epsilon}$ /log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie fmS, Variation des Wassergehaltes
- A 58 Ersatz der Kriechkurven im log ċ/log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = -1, Versuchsserie fmS, Variation des Wassergehaltes
- A 59 Ersatz der Kriechkurven im log ċ/log t-Diagramm durch Geraden mit der Steigung m = −1, Versuchsserie fmS, Variation des Wassergehaltes

- A 60 Bestimmung der fiktiven Stauchungsrate $\dot{\epsilon}_{(1)}$ zur Zeit t = 1
- A 61 Hyperbolische Kriechfunktion im \dot{e} /t-Diagramm, Gegenüberstellung Rechen~ und Versuchswerte, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit $\rho_d = 1.66 \ t/m^3$
- A 62 Hyperbolische Kriechfunktion im $\dot{\epsilon}/t$ -Diagramm, Gegenüberstellung Rechen- und Versuchswerte, Versuchsserie mgS, 7-Tage-Versuche mit ρ_d =1.83 t/m³
- A 63 Hyberbolische Kriechfunktion im ἐ/t-Diagramm, Gegenüberstellung Rechen- und Versuchswerte, Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 600
- A 64 Hyperbolische Kriechfunktion im ε/t-Diagramm, Gegenüberstellung Rechen- und Versuchswerte, Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 600
- A 65 Hyperbolische Kriechfunktion im ċ/t-Diagramm, Gegenüberstellung Rechen- und Versuchswerte, Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 1000
- A 66 Hyperbolische Kriechfunktion im ε/t-Diagramm, Gegenüberstellung Rechen- und Versuchswerte, Versuchsserie mS, Einpreβmittel Durcisseur 1000
- A 67 Hyperbolische Kriechfunktion im c/t-Diagramm, Gegenüberstellung Rechen- und Versuchswerte, Versuchsserie fmS, Variation der Spannung
- A 68 Hyperbolische Kriechfunktion im ċ/t-Diagramm, Gegenüberstellung Rechen- und Versuchwerte, Versuchsserie fmS, Variation der Dichte und des Wassergehaltes
- A 69 Instabile Probekörper mit einem von der hyperbolischen Funktion abweichendem Kriechverhalten, Versuchsserie fmS

- A 70 Zeitabhängige Auftragung des "Kriechmaßes", Versuchsserie mgS, 40-Tage-Versuche
- A 71 Zeitabhängige Auftragung des "Kriechmaßes", Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 600
- A 72 Zeitabhängige Auftragung des "Kriechmaßes", Versuchsserie mS, Einpreßmittel Durcisseur 1000
- A 73 Anwachsen des "Kriechmaßes" mit zunehmender Versuchsdauer, Versuchsserie fmS
- A 74 Zeitabhängige Auftragung des "Kriechmaßes", Versuchsserie fmS, Variation der Spannung
- A 75 Starke Streuungen des "Kriechmaßes", Versuchsserie fmS
- A 76 Kontrolle des "Kriechmaßes" durch Einführung des "gleitenden Mittels", Versuchsserie fmS
- A 77 Einaxiale Retardationsversuche, Zeit-Setzungs-Kurven von unter Auflast verpreßten Probekörpern, Versuchsserie mgS mit ρ_A = 1.66 t/m³
- A 78 Einaxiale Retardationsversuche, Zeit-Setzungs-Kurven von unter Auflast verpreßten Probekörpern, Versuchsserie mgS mit $\rho_d = 1.83 \text{ t/m}^3$
- A 79 Gegenüberstellung des Kriechverhaltens von Probekörpern,die mit und ohne Auflast verpreßt wurden im log é/log t-Diagramm (Rechenwerte)
- A 80 Gegenüberstellung des Kriechverhaltens von Probekörpern, die mit und ohne Auflast verpreßt wurden im $\dot{\epsilon}/t\text{-Diagramm},~\sigma_1$ = 250 und 500 kN/m²
- A 81 Gegenüberstellung des Kriechverhaltens von Probekörpern, die mit und ohne Auflast verpreßt wurden im \dot{e}/t -Diagramm, $\sigma_1 = 750$ und 1000 kN/m²

- A 82 Dreiaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung vom Seitendruck, $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$ A 83 Dreiaxiale Retardationsversuche, Abhängigkeit der axialen Stauchung vom Seitendruck, $\sigma_1 = 600 \text{ kN/m}^2$ A 84 Dreiaxiale Retardationsversuche im lne/lnt-Diagramm, $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$
- A 85 Dreiaxiale Retardationsversuche im lne/Int-Diagramm, $\sigma_1 = 600 \text{ kN/m}^2$
- A 86 Hyperbolische Kriechfunktion dreiaxialer Retardationsversuche
- A 87 Gegenüberstellung dreiaxialer und einaxialer Retardationsversuche im log $\dot{\varepsilon}/\log$ t-Diagramm
- A 88 Summarische Erfassung aller einaxialer Retardationsversuche unter Zugrundelegung des Stabilitätskriteriums $\dot{\epsilon} \cdot t \leq 0.12$ für injizierte Mittelbis Grobsande
- A 89 "a-priori"-Versagenswahrscheinlichkeit, Mittelwerte und Standardabweichungen

Şchriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

Heft 1982	1	Tragfähigkeit von Verpreßankern in nichtbindigem Boden
Heft 1983	2	Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässig- keitstheorie in der Bodenmechanik
Heft 1984	3	In situ-Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifig- keit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach
Heft 1985	4	Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikatgel-injizierter Sande

.



Bild 1: Ansicht der Injektionsanlage zur serienmäßigen Herstellung von Probekörpern



Bild 2: Aufbereitung des Einpreßmittels in getrennten Rührwerken



Bild 3: Durchströmung der Injektionsbehälter mit dem Einpreßmittel

Bild 4: Ausdrücken der erhärteten Probe aus dem Injektionsbehälter

Bildanlage



Bild 5: Einaxialer Druckversuch



Bild 6: Einaxiale Retardationsversuche



Bild 7: Verpressen der Sande unter statischer Auflast im Belastungsgerät



Bild 8: Entfernen der Seitenteile nach der Aushärtung der Probe



Schemaskizze der Injektionsanlage

LEGENDE: ① Vacuumpumpe

- ② Druckluftanschluß
- ③ Wasserleitungsanschluß
- () Behåller f.entlüftetes Wasser
- (5) Schauglas für Entlüftung
- 6 Manometer 0 10 bar
- () Ventil
- Führungskolben auf Wasser

- ③ Druckminderungsventil
- 🔞 Manometer 0-16 bar
- Mischgutbehälter
- 🕲 Überdruckventil
- (Elektrisches Rührwerk
- 🛞 Manometer 0-10 bar
- B Probebehälter

- 🔞 Überlauf
- @ Mischgut Auffangbehälter
- (B) Ablauf Schmutzwasser
- 🕑 Ablauf Leitungswasser
- 🗙 Schalthähne

Vertikalschnitt durch





- 1 Flügelschrauben
- 2 Lochplatte mit Verleilersieb
- 3 Austrittsöffnungen
- 4 Zylindermantel
- 5 Lochplatte mit Verteilersieb
- 6 Gummidichtung
- 7 Bodenplatte
- 8 Anschluß für Injek tionsschlauch
- 9 Fließscherna der Injektionsflüssigkeit

Institut für Grundbou und Badenmechanik der Techn. Hachschule München.



















A 11



A 12





A 14








Spannung d ₁ (kN/m ²)		200	300	400	500		
Sandart	Verpreßmittel	axiale Stauchung mach 7 Tagen $\mathcal{E}_{7}(\mathcal{I})$ (Hittelwerte)					
faS	Durc. 600	0.09	0.23 nicht untersucht		nícht untersucht		
	Durc_1000	nicht untersucht	nicht untersucht	nicht untersucht	nícht untersucht		
گ ي	Durc. 600	0,28	0.34	0.43	0.49		
	Ourc.1000	0.08	0.17	0_12	0,19		
ngS	Dure. 600	x	x	x	X		
	Durc_1000	nicht untersucht	0,14 (250)	nicht untersucht	0.25		

* Versuch micht möglich, da unzureichende Verfestigung (Verformung unter Eigengewicht)

Tabelle 2: Abhängigkeit des Spannungsverformungsvarhaltens von der Korngröße













Herstellungsart des Probekörpers	Trockendichte ^Q d	Gewichtszunahme durch Injektion 66.	Rechnerisches Porenvolumen V n	Porenfüllungsgrad	Spannung	. Stauchungsrate (% d.Probenanfangshöhe/h)		axiale Stauchung nach 7 Tagen
					σ _j -konst.	nach 1 Tag	nach 7 Tagen	
	(t/n ³)	(g)	(c= ³)		(kN/= ²)	έ ₁	έ _τ	1 der Proben- anfangshöbe
					200	1.19·10 ⁻³	6.60-70-5	0,12
Sand vorgetrocknet	1,800	763	674	0,94	400	1.37-10-3	1.63-10 ⁻⁴	0,13
Sand vorgetrocknet und	ind vorgetrocknet und It Vasser gesättigt 1,790 753				200	8.10-10-4	3.27.10-5	0,08
mit Wasser gesättigt		679	0,92	400	9.36•10 ⁻⁴	1.62-10-4	0,12	
Sand vorgetrocknet und mit	1,785	740	682	0,90	200	4.37-10-4	0	0,09
entlüfteten Wasser gesättigt					400	1.87-10 ⁻³	1.30-10-4	0,24
Einhaussessesshalt 4 1	1,635 790	700	796	0,83	200	1.79-10-2	2.08-10-4	1,21
CINDAUWASSELGENALL 4 >		175			400	4.38-10-3	1.38-10-4	1,11

Tabelle 3: Abhängigkeit der Verforzungseigenschaften injizierter Mittel- bis Grobsande vom Wassergehalt (Mittelverte)



٠































۰.,



тS



тS

γ_d = 1,70 t/m ³

Verpreßmittel Durcisseur 1000





Probenserie 1	(An1.44) mit A(36) - 6.9.10 ⁻⁵ und a	~ 49 ⁰				
	Versuchsdauer t (h)		36	60	108	156
	Stauchungsrate é (% der Probenanfangshöhe/h)	Rachenwarta	6.97-10-4	4 . 19 - 10 ⁻⁴	2.33-10 ⁻⁴	1.61.10 ⁻⁴
Probenseria 2	(Anl.45) wit A ₍₃₆₎ - 3.1.10 ⁻⁵ und a	≠ 56°				
	Stauchungsrate é (% der Probenanfangshöhe/h)	Rechenxerte	3.19-10 ⁻⁴	1.91.10 ⁻⁴	1.06-10-4	7.36·10 ⁻⁵
Mittelverte	(Anl.46) mit A ₍₃₆₎ - 4.6-10 ⁻⁵ und a	- 56°				
	Stauchungsrate É (% der Probenanfangshöhø/h)	Rechenverte	4.71-10-4	2,83-10 ⁻⁴	1.57.10-4	1.09-10 ⁻⁴
		Versuchswerte (Probe mit o ₁ =500 kN/m ²)	6.46-10 ⁻⁴	3.96-10 ⁻⁴	2.36.10 ⁻⁴	1.67-10-4

Tabelle 4: Rechmerisch nach Singh und Mitchell ermittelte Stauchungsraten im Vergleich zu Versuchsverten





Δ












,

A 55'






































































