

7 Verifizierung der theoretischen Überlegungen durch experimentelle Untersuchungen

Mit Hilfe von Versuchen sollten die in Kapitel 6 dargelegten theoretischen Überlegungen zum Ausbreitungs- und Reaktionsverhalten der beteiligten Stoffe sowie das dort vorgestellte Modell für ein dränfähiges Stabilisierungsverfahren verifiziert werden.

In einer ersten Versuchsreihe wurden Untersuchungen an einzelnen Bodenelementen durchgeführt. Diese dienten dazu, die spezifischen Eigenschaften der Injektionsmedien zu untersuchen und grundlegende Zusammenhänge sowie maßgebende Parameter zu ermitteln.

Auf der Grundlage der dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem nächsten Schritt Modellversuche an großen Bodenproben durchgeführt, mit Hilfe derer das Verfahren u. a. auch an natürlichen Kornmischungen erprobt und größere Stabilisierungskörper hergestellt wurden. Diese Versuche dienten des weiteren dazu, einen Feldversuch vorzubereiten, der den Abschluß der experimentellen Arbeiten bildete.

7.1 Experimentelle Untersuchungen

7.1.1 Versuche an Bodenelementen

In der ersten Versuchsreihe wurden die relevanten Eigenschaften der Arten von Böden ermittelt, die für das DRÄNSTAB-Verfahren in Frage kommen. Da hierbei ein gewisses Spektrum an Böden abgedeckt werden sollte, wurden verschiedene Modellerdstoffe ausgewählt, aus denen zylindrische Proben (\varnothing : 100 mm, Höhe: 155 mm) hergestellt wurden, die sozusagen Elemente eines ggf. zu behandelnden Untergrundbereiches repräsentieren.

An den ausgewählten Modellerdstoffen, bzw. an den daraus hergestellten Proben wurden verschiedene Arten von Versuchen durchgeführt:

- ◆ Kennzeichnende Versuche,
- ◆ Versuche zur Bestimmung der injektionstechnischen Eigenschaften,
- ◆ Versuche zum Verhalten des behandelten Materials.

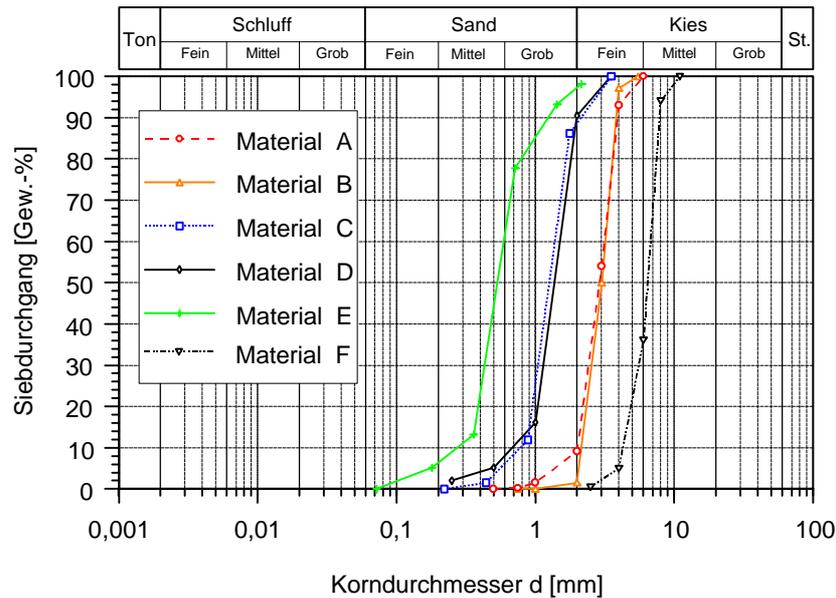


Abb. 7.1: Korngrößenverteilung der verwendeten Probenmaterialien

Tab. 7.1: Kennwerte der in den Versuchen verwendeten Probenmaterialien

Material Bez.	Kornfraktion nominal [mm]	Bezeichnung	Porenanteil n [-]	$d_{10}^{(1)}$ [mm]	$d_{60}^{(1)}$ [mm]	U [-]	$k_w^{(2)}$ [m/s]	$k_{wG}^{(3)}$ [m/s] bei: $v_{wG}=100$ cP	spez. Oberfläche ⁽⁴⁾ [m ² /m ³]
A	2 - 4	fG	0,26	2	3,2	1,6	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	2,14
B	2 - 4	fG	0,28	2,2	3,2	1,5	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	2,05
C	0 - 2	gS	0,33	0,9	1,6	1,8	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	4,36
D	0 - 2	gS, fg	0,32	0,68	1,5	2,2	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	5,28
E	0 - 2	gS, ms	0,34	0,32	0,8	2,5	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	10,78
F	4 - 8	mG, fg	0,30	4,9	6,9	1,4	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,96

⁽¹⁾: Je nach Lieferung zeigten einige Probenmaterialien trotz nominell gleicher Kornfraktion Unterschiede, besonders im Feinkornanteil. Daraus ergeben sich auch leichte Unterschiede in den Ergebnissen der Laborversuche.

⁽²⁾: Durchlässigkeit k_w für Wasser: rechnerisch ermittelt nach HAZEN: $k = C \cdot d_{10}^2$

⁽³⁾: Durchlässigkeit k_{wG} für Wasserglas: rechnerisch ermittelt nach MAAG, 1938

⁽⁴⁾: Spez. Oberfläche O: rechnerisch ermittelt nach BEYER, 1967.

In Anlehnung an die in der Literatur angegebenen Anwendungsbereiche von chemischen Injektionsmitteln auf Wasserglasbasis (KUTZNER, 1991; DONEL, 1990) wurden mittel- bis grobsandige sowie fein- bis mittelkiesige Probenmaterialien als Modellerdstoffe ausgewählt. Die entsprechenden Kornverteilungen der verwendeten Materialien und deren kennzeichnende Parameter können der Abb. 7.1 und der Tab. 7.1 entnommen werden.

Die Versuche zur Bestimmung der Feldkapazität (für Wasserglaslösungen) wurden in speziell angefertigten Versuchszylindern aus Stahl durchgeführt (Versuchsaufbau s. Abb. 7.2). Die verschiedenen Probenmaterialien wurden darin in nahezu trockenem Zustand (w ca. 1%) und in etwa mitteldichter Lagerung eingebaut.

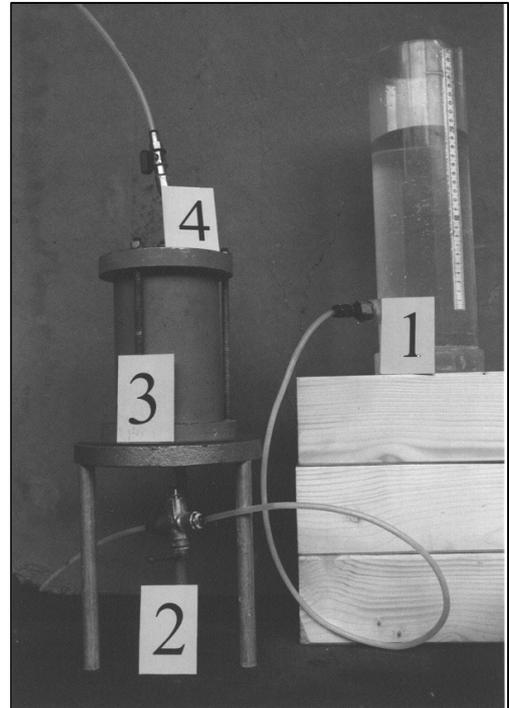


Abb. 7.2: Versuchsaufbau für die Versuche an den Bodenelementen zur Bestimmung der Feldkapazitäten

- (1) Vorratsbehälter für Wasserglas
- (2) Drei-Wege-Hahn für Sättigung u. Entleerung
- (3) Versuchszylinder (\varnothing : 100 mm, Höhe: 155 mm)
- (4) oberer Auslaß und Entlüftung

Die Proben wurden bei diesen Versuchen mit handelsüblicher, sog. technischer Wasserglaslösung (Bé 37/40) sowohl in unverdünnter Form ($w_{WG} = 63,6 \text{ M\%}$) als auch in weiterer Verdünnung (w_{WG} bis 69,7 M%) beaufschlagt.

Zur Bestimmung der Feldkapazität wurden die Prüfkörper zunächst vollständig mit der entsprechenden Wasserglaslösung gesättigt; danach ließ man das überschüssige Wasserglas frei nach unten ablaufen. Nach Beendigung des Wasserglasaustrittes wurde über Wägung die im Prüfkörper verbliebene Wasserglasmenge bestimmt, wodurch die Feldkapazität des jeweiligen Probenmaterials ermittelt wurde. Die Wartezeiten bis zum Ende des Wasserglasaustrittes betragen in diesen Versuchen - in Abhängigkeit von der Korngröße und der Wasserglasverdünnung - zwischen 20 und 40 Minuten.

Die Ergebnisse dieser ersten Versuchsreihe an den Bodenelementen können den Abb. 7.3 bis Abb. 7.6 entnommen werden. Dabei sind die Feldkapazitäten (Abb. 7.3 oben) bzw. die entspre-

chenden Sättigungsgrade (Abb. 7.3 unten) der untersuchten Materialien in Abhängigkeit vom Wassergehalt der verwendeten Wasserglaslösungen aufgetragen.

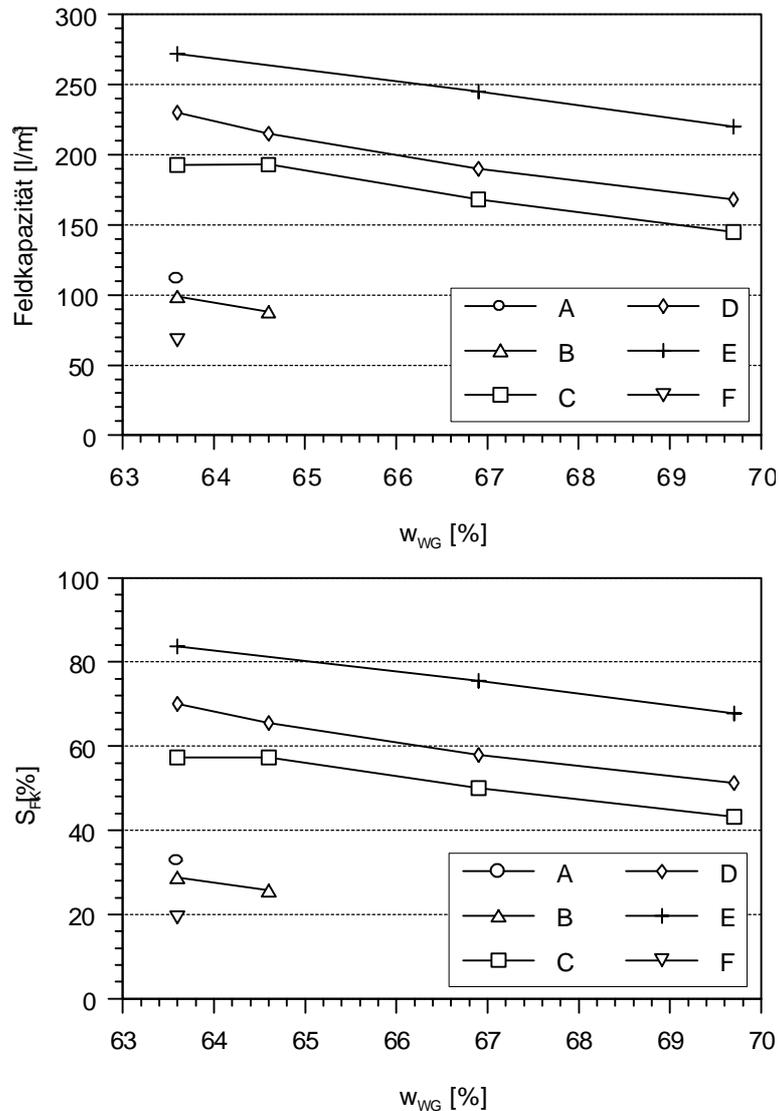


Abb. 7.3: In den Versuchen ermittelte Feldkapazitäten der Probenmaterialien bei unterschiedlichen Wassergehalten (w_{WG}) des verwendeten Wasserglases (oben), sowie die entsprechenden Sättigungsgrade bei Feldkapazität (S_{FK}), in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Wasserglaslösung (unten)

Es ergaben sich erwartungsgemäß unterschiedliche Feldkapazitäten der untersuchten Probenmaterialien, und zwar sowohl in Abhängigkeit von deren Korngröße als auch vom Verdünnungsgrad der verwendeten Wasserglaslösung (Abb. 7.3).

Naturgemäß zeigten dabei die feinkörnigeren Materialien (Abb. 7.3, Proben Bez.: C, D, E) eine deutlich höhere Feldkapazität als die vergleichsweise grobkörnigen Probenmaterialien (Abb. 7.3, oben; A, B, F). Entsprechend verhält es sich auch mit der Porensättigung (Abb. 7.3, unten), die bei den feinkörnigen Materialien bei z. T. über 80 % liegt, während sie bei den grobkörnigen Probenmaterialien auf bis zu 20 % zurückgeht.

Diese Abhängigkeit von Feldkapazität bzw. Porensättigung von der „Feinkörnigkeit“ des Probenmaterials kann damit erklärt werden, daß feinkörnige Erdstoffe im Vergleich zu den grobkörnigen insgesamt eine größere spezifische Oberfläche aufweisen (vgl. hierzu Abb. 7.5) und zudem aufgrund ihrer größeren Anzahl an Körnern je Volumeneinheit einer Wasserglasanlagerung insgesamt auch eine größere Zahl von Porenwickeln und Porenengstellen zur Verfügung stellen. Aus diesem Grund kann in feinkörnigen Materialien insgesamt mehr Wasserglas – wie auch mehr Wasser - gegen die Schwerkraft zurückgehalten werden, was die höhere Feldkapazität bedingt.

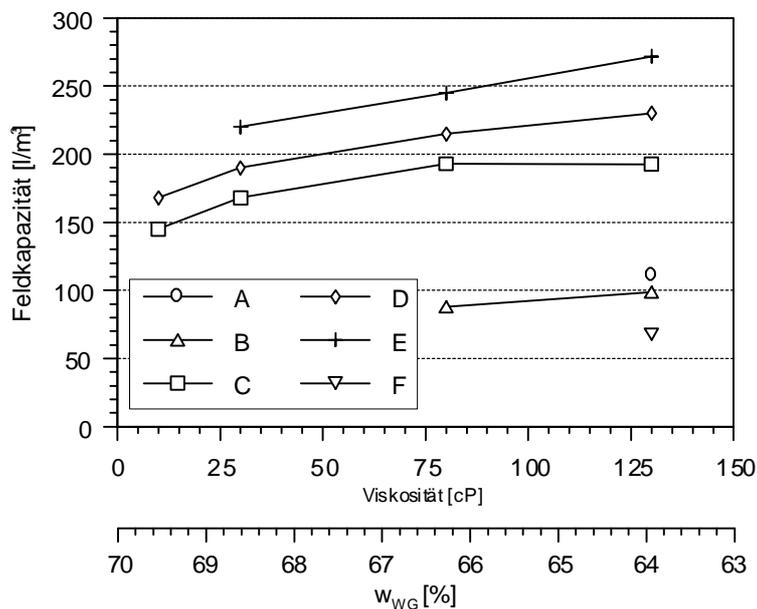


Abb. 7.4: Abhängigkeit der Feldkapazität von der Zähigkeit (Viskosität) der verwendeten Wasserglaslösung

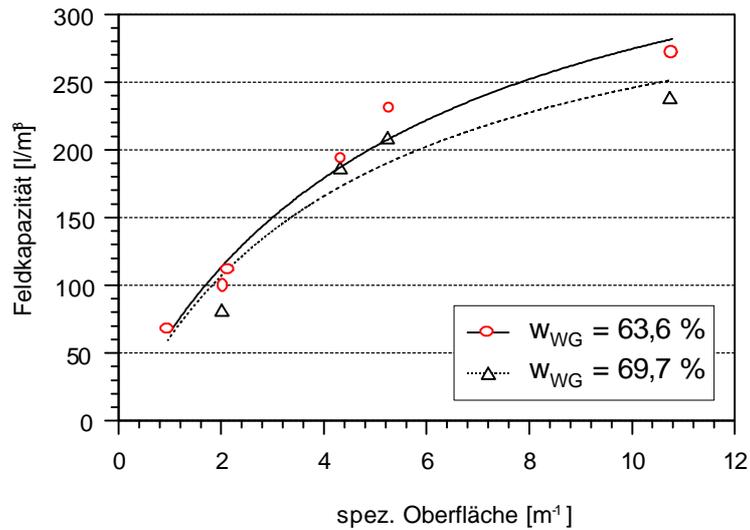


Abb. 7.5: Abhängigkeit der Feldkapazität unterschiedlicher Probenmaterialien für Wasserglas in Abhängigkeit von deren spezifischen Oberflächen O (Bestimmung der spez. Oberfläche nach BEYER, 1967)

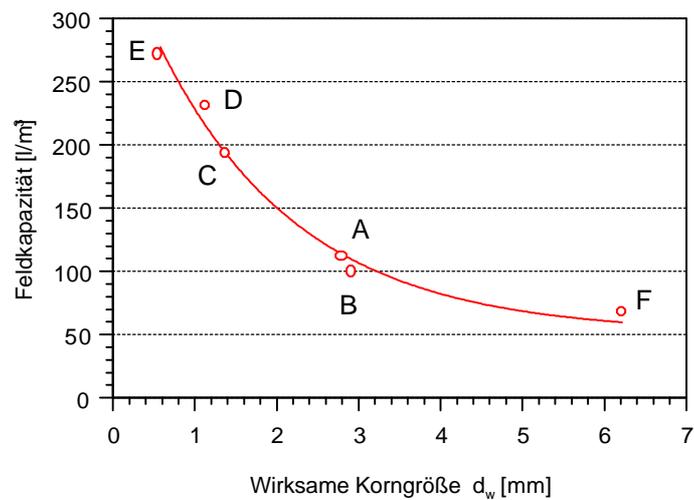


Abb. 7.6: Abhängigkeit der Feldkapazität der Probenmaterialien von der wirksamen Korngröße d_w

Aber nicht nur die Zahl der zur Verfügung stehenden Porenzwickel und die Größe der spez. Oberfläche sind entscheidend für die Größe der Feldkapazität. Aus Abb. 7.3 wird auch deutlich, daß die Feldkapazität eines Materials auch vom Wasseranteil der Wasserglaslösung beeinflusst wird und beispielsweise mit zunehmender Verdünnung (d. h. Wassergehalt w_{WG}) des Wasserglases

abnimmt, denn diese Verdünnung der Wasserglaslösung bewirkt eine Verringerung der Viskosität. In Abb. 7.4 ist die Feldkapazität in Abhängigkeit von den entsprechenden Viskositäten dargestellt.

Der Einfluß der Viskosität der Wasserglaslösung auf FK_{WG} ist allerdings nicht sehr ausgeprägt; er steuert vornehmlich die Zeit des „Leerlaufens“ im Porenraum. Gleichwohl verbleibt von einem dickflüssigen Medium auch etwas mehr Masse im Porenraum haften.

Wie sich gezeigt hat, sind demnach die Korngröße („Feinkörnigkeit“) des Bodens, untergeordnet auch die Zähigkeit (Viskosität) der verwendeten Wasserglaslösung die für die Größe der Feldkapazität maßgebenden Parameter. Um diese „Feinkörnigkeit“ des Bodens durch eine kennzeichnende Größe zu charakterisieren, wurde die wirksame Korngröße (d_w) herangezogen. In Abb. 7.6 sind die den verwendeten Modellerdstoffen entsprechenden wirksamen Korngrößen in Abhängigkeit von der entsprechenden Feldkapazität aufgetragen. Deutlich wird dabei, daß mit zunehmender wirksamer Korngröße die Feldkapazität abnimmt.

Nach Abschluß der Untersuchungen zur Bestimmung der Feldkapazität wurden die Prüfkörper mit konzentrierter $CaCl_2$ -Lösung im Überschuß (ca. 1,5-fache Menge des in der Probe verbliebenen Wasserglases) beaufschlagt. Nachdem das überschüssige Härtermaterial abgelaufen war, konnten die jeweiligen Stabilisierungsversuche beendet und die Proben hinsichtlich ihrer Durchlässigkeiten und Festigkeiten untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Tab. 7.2 zusammengestellt.

Zunächst kann festgestellt werden, daß alle Probenkörper nach ihrem Ausbau einen insgesamt gut verfestigten Eindruck machten. Die visuelle Begutachtung zeigte weiterhin, daß das entstandene Silikatgel den Porenraum nicht vollständig ausfüllte, sondern vorwiegend an den Korn-zu-Korn-Kontakten entstanden war. Dies entsprach den eingangs dargelegten Modellvorstellungen.

Die in einachsialen Druckversuchen ermittelten Festigkeiten lagen insgesamt zwischen 0,3 und fast 2,4 MPa. Dabei konnte eine deutliche Abhängigkeit der Festigkeiten der Probenkörper von der Feldkapazität bzw. Porensättigung des jeweiligen Materials, und damit zum einen von der

„Feinkörnigkeit“ des Probenmaterials, zum anderen vom Verdünnungsgrad der eingesetzten Wasserglaslösung festgestellt werden (Abb. 7.7).

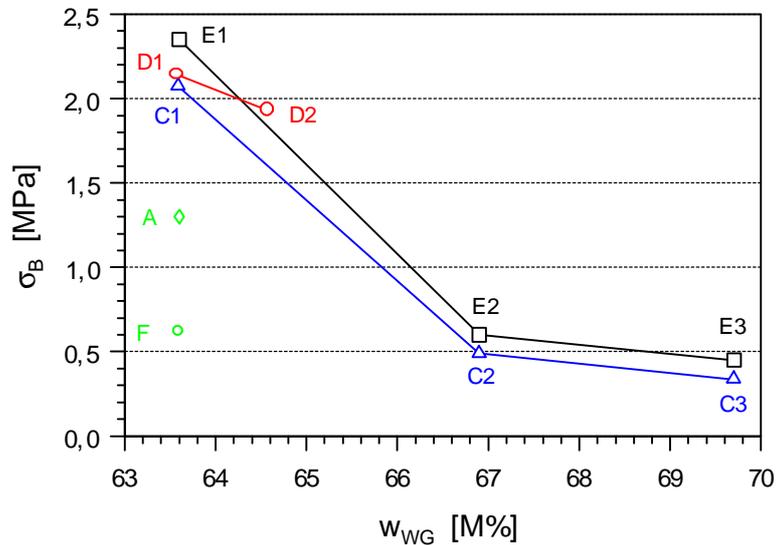


Abb. 7.7: Abhängigkeit der einaxialen Festigkeiten der stabilisierten Prüfkörper von der Verdünnung des Wasserglases (Abschergeschwindigkeit bezügl. Ausgangsprobenhöhe: 0,2%/min; Probenbezeichnung vgl. Tab. 7.1)

Beispielsweise lagen die Festigkeiten bei dem feinkörnigen Material E unter Verwendung einer unverdünnten Wasserglaslösung (Bé 37/40) bei bis zu 2,4 MPa und damit bei knapp 50 % der Festigkeiten, wie sie bisher mit dem Joosten-Verfahren für Verfestigungszwecke in der Praxis erzielt worden waren (KUTZNER, 1991). Entsprechend der jeweiligen Größe der Feldkapazität bzw. Porensättigung (Abb. 7.3) waren die Festigkeiten allerdings sehr unterschiedlich, und lagen beispielsweise bei dem (grobkörnigen) Material F mit ca. 0,6 MPa erwartungsgemäß deutlich niedriger.

Wie sich gezeigt hat, sind die erzielbaren Festigkeiten direkt von der Feldkapazität des Materials für Wasserglas (FK_{WG}), d. h. vom Anteil des Silikatgels im Porenraum, abhängig. Die mit dem DRÄNSTAB-Verfahren erzielbaren Festigkeiten können demnach folgendermaßen abgeschätzt werden, wenn man von einem statistisch irregulären Haufwerk von Körnern ausgeht (vgl. Abb. 7.8).

Dann gilt: $n_{\text{Fläche}} = n_{\text{Volumen}}$ und

$$n_{\text{WG-Fläche}} = n_{\text{WG-Volumen}} = \text{FK}_{\text{WG}}.$$

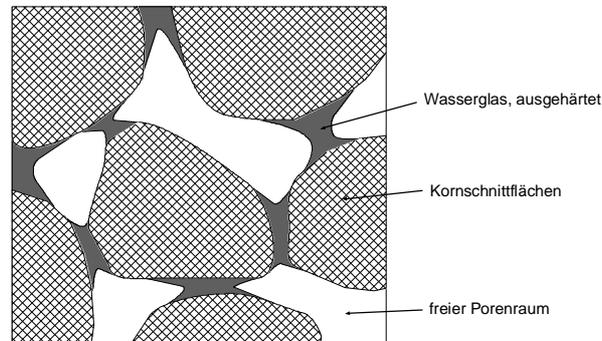


Abb. 7.8: Schnittbild durch Porenraum (schematisch)

Hiervon ausgehend und unter der Annahme, daß die Festigkeit überwiegend eine Kohäsionsfestigkeit des abgebundenen Wasserglasses ist, ist die Festigkeit σ_B mit der Feldkapazität FK_{WG} direkt proportional über einen Faktor (β) verknüpft:

$$\sigma_B = \text{FK}_{\text{WG}} \cdot \beta$$

$$\beta = \sigma_B / \text{FK}_{\text{WG}}.$$

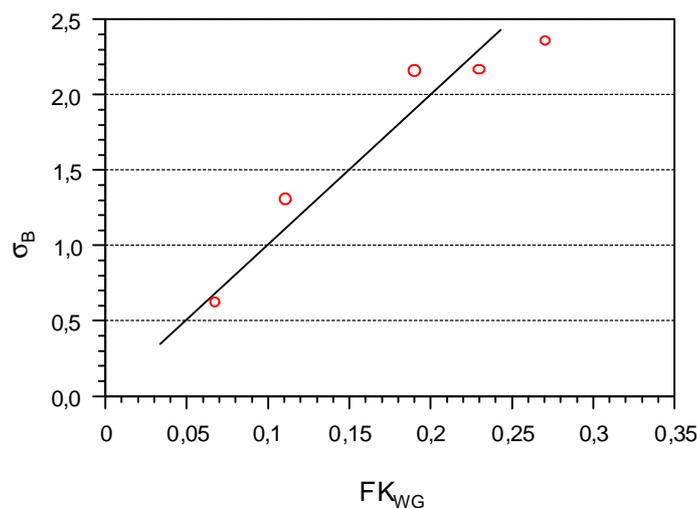


Abb. 7.9: Abhängigkeit der Festigkeit von der Feldkapazität von stabilisierten Probekörpern mit einer Wasserglaslösung Bé 37/40 ($w_{\text{WG}} = 63,6 \text{ M\%}$)

Entsprechend der Darstellung in Abb. 7.9 kann der Faktor bei Verwendung von unverdünntem Na-Wasserglas Bé 37/40 ($w_{WG} = 63,6 \text{ M\%}$) mit $\beta \approx 10$ angegeben werden. Dieser Faktor β entspricht in etwa der Festigkeit eines silikatisch gebundenen Sandsteines ($\sigma_B \approx 10 \text{ MPa}$), der von der Qualität einem nach dem Joosten-Verfahren verfestigten Sand entspricht und bei dem der Porenraum zwischen den Sandkörnern vollständig mit (natürlichem) Silikatgel gefüllt ist.

Des weiteren zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Festigkeit vom Verdünnungsgrad der Wasserglaslösung (Abb. 7.7). Ausgehend von einem handelsüblichen Wasserglas Bé 37/40 mit $w_{WG} = 63,6 \text{ \%}$ wurde innerhalb einer Verdünnungsreihe (C1 – C2 – C3; D1 – D2; E1 – E2 – E3) mit diesem die jeweils größten Festigkeiten ermittelt. Daß die Festigkeiten mit zunehmender Verdünnung tendenziell geringer werden, erklärt sich mit dem geringer werdenden Kieselsäure- (SiO_2 -) Gehalt der Wasserglaslösung und des sich daraus bildenden Silikatgels.

Tab. 7.2: Zusammenstellung der Ergebnisse der Durchlässigkeits- und Festigkeitsuntersuchungen an den nach dem modifizierten Joosten-Verfahren behandelten Prüfkörper

Proben Bez.	$k_{W,vor}$ [m/s] (vor Injektion)	w_{WG} [M%]	Viskosität μ_{WG} [cP]	$k_{W,nach}$ [m/s] (nach Injektion)	α ($k_{W,nach} / k_{W,vor}$)	Einaxiale Festigkeit σ_B [MPa]
A	$4,6 \cdot 10^{-2}$	63,6	130	$7,8 \cdot 10^{-4}$	0,017	1,30
B	$5,6 \cdot 10^{-2}$	63,6		$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,072	
C ₁	$9,4 \cdot 10^{-3}$	63,6		$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,005	2,15
C ₂	$9,4 \cdot 10^{-3}$	66,9	30	$6,6 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,51
C ₃	$9,4 \cdot 10^{-3}$	69,7	10	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,004	0,35
D ₁	$5,4 \cdot 10^{-3}$	63,6	130	$3,5 \cdot 10^{-5}$	0,0064	2,16
D ₂	$5,4 \cdot 10^{-3}$	64,6	80	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,007	1,89
E ₁	$1,2 \cdot 10^{-3}$	63,6	130	$4,8 \cdot 10^{-6}$	0,004	2,35
E ₂	$1,2 \cdot 10^{-3}$	66,9	30			0,60
E ₃	$1,2 \cdot 10^{-3}$	69,7	10			0,45
F	$2,8 \cdot 10^{-1}$	63,6	130	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,079	0,62

Die Durchlässigkeitsuntersuchungen ergaben vergleichsweise gute Restdurchlässigkeiten der behandelten Prüfkörper. Die Proben wurden noch im Versuchszylinder mit konstanter Druckhöhe solange durchströmt, bis sich ein gleichbleibender k-Wert einstellte.

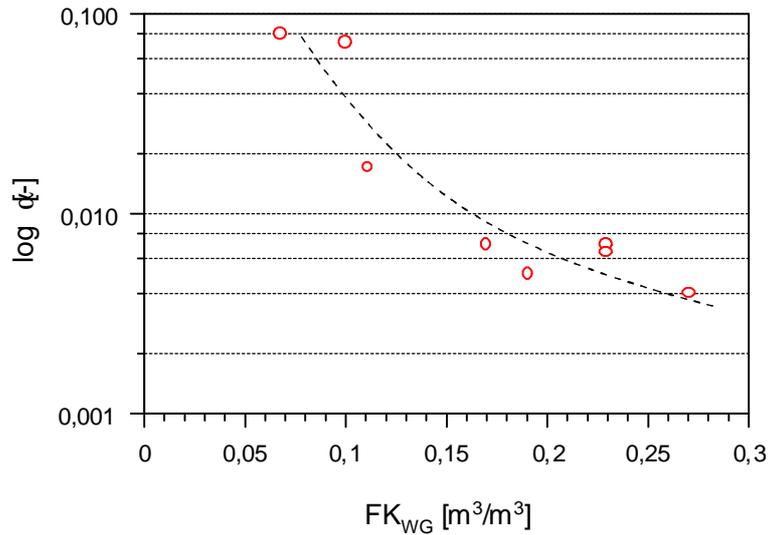


Abb. 7.10: Abhängigkeit der Durchlässigkeitsverringerng (a) von der Größe der Feldkapazität (FK_{WG})

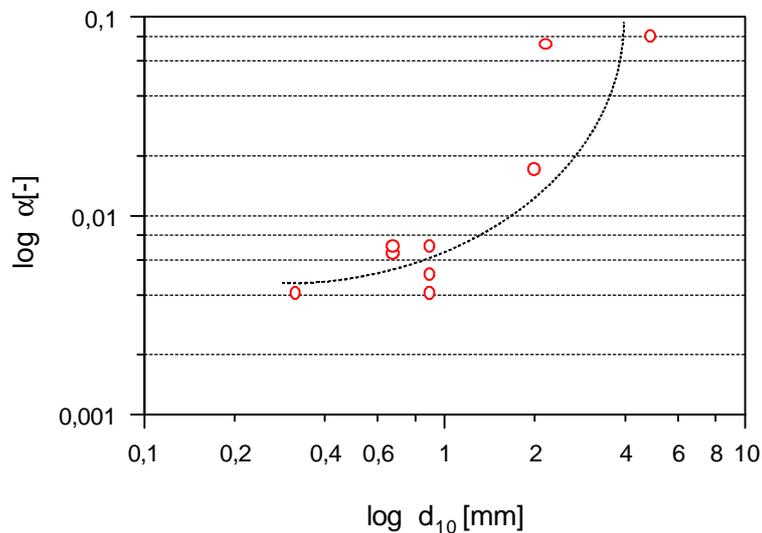


Abb. 7.11: Abhängigkeit der Durchlässigkeitsverringerng (a) vom Korndurchmesser bei 10% Siebdurchgang (d_{10})

Im Vergleich zu den ursprünglichen Werten (nach DIN 18130 als "stark durchlässig" zu bezeichnen) verringerte sich die Durchlässigkeit um die in Tab. 7.2 angegebenen Faktoren α ($\alpha = k_{W,nach} / k_{W,vor}$) zwischen 0,004 und 0,079, je nach Viskosität der verwendeten Wasserglaslösung. Die behandelten Prüfkörper können nach DIN 18 130 noch als „durchlässig“ bezeichnet werden.

Wie die Darstellung in Abb. 7.10 verdeutlicht, hängt die Verringerung der Durchlässigkeit eines Materials infolge des DRÄNSTAB-Verfahrens unmittelbar von der Größe der Feldkapazität ab. Bei hohen Feldkapazitäten ergibt sich eine starke Verringerung der ursprünglichen Durchlässigkeit des behandelten Bodens (kleiner α -Wert), bei niedrigen Feldkapazitäten verringert sich die Durchlässigkeit infolge der Behandlung weniger stark (großer α -Wert).

In Abb. 7.11 ist die Verringerung der Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von den jeweiligen Korndurchmessern bei 10 % Siebdurchgang aufgetragen.

Als Ergebnis dieser Versuche an Bodenelementen kann zusammenfassend festgestellt werden:

- Die mit dem beschriebenen Verfahren stabilisierten Prüfkörper weisen eine relativ hohe Restdurchlässigkeit auf, d. h. durch das weitgehende Leerlaufen der zunächst wasserglasgesättigten Poren verbleibt schließlich nur noch wenig Wasserglas, was die gute Durchlässigkeit der stabilisierten Probenkörper bedingt.
- Maßgebende Größe für Festigkeit und Durchlässigkeit ist die Feldkapazität.
- Die Durchlässigkeit verringert sich durch die Behandlung mit dem DRÄNSTAB-Verfahren umso stärker, je höher die Feldkapazität des Bodens für Wasserglas ist.
- Die erzielbaren absoluten Festigkeiten sind direkt abhängig von der Größe der Feldkapazität. Sie liegen bei bis zu ca. 50 % der mit dem Joostenverfahren erzielbaren Festigkeiten und sind damit als ausreichend zu bezeichnen
- Wie die visuelle Begutachtung ergab, beruht die Stabilisierung nahezu ausschließlich auf einer Verstärkung der Korn-zu-Korn-Kontakte, so daß im behandelten Bereich Erosions- und Suffosionsvorgänge wirksam unterbunden werden.

Aufgrund der stabilisierenden Wirkung auf das Korngerüst unter Beibehaltung einer möglichst hohen Restdurchlässigkeit (Drämfähigkeit) der entsprechend behandelten Bodenbereiche wurde das auf der Grundlage des Joosten-Verfahrens erarbeitete neue Stabilisierungsverfahren auch als **”DRÄNSTAB”-Injektionsverfahren** bezeichnet.

7.1.2 Versuche an Großproben

Die in einem nächsten Schritt - auf der Basis der aus den Elementversuchen gewonnenen Erkenntnisse - an größeren Proben durchgeführten Versuche dienten dazu, die eingangs aufgestellten theoretischen Überlegungen zum räumlichen Ausbreitungsverhalten des Wasserglases und der daraus letztendlich resultierenden Form des Stabilisierungskörpers im ungesättigten Bodenbereich zu überprüfen.

Hierzu wurden zunächst in einem Injektionshalbzylinder (s. Abb. 7.12) Versuche mit einer Verpreßstelle und mit verschiedenen Kornmischungen und anschließend ein Großversuch mit drei Verpreßstellen und unter Verwendung natürlichen Materials vom Standort des späteren Feldversuches durchgeführt.

Dieser letztgenannte Großversuch diene auch zur Klärung von Fragen zur Einpreßtechnik und v. a. zur Vorbereitung eines Feldversuches, der die Untersuchungen abschließen sollte.

7.1.2.1 Versuche mit einer Einpreßstelle in einem Injektionshalbzylinder

Für diese Versuche, mit denen die Funktionsweise des DRÄNSTAB-Injektionsverfahrens anschaulich dargestellt werden sollte, wurde ein Halbzylinder (aus Stahl) mit einer ebenen Vorderseite (aus Plexiglas) ausgestattet. Der probeweise zu behandelnde Boden kann in dem so geschaffenen Versuchsbehälter in gewünschter Lagerungsdichte eingebaut werden, und die Ausbreitung des Injektionsmittels beim Einpreßversuch kann unmittelbar beobachtet werden.

Die Einpreßstelle wurde als Bohrung von vorne durch die Plexiglasscheibe hindurch angebracht. An der Sohle des Halbzylinders war eine Dränschicht mit Auslaß zur ungehinderten Ableitung überschüssigen Fluids und damit zur Vermeidung eines Aufstaus angeordnet worden.

Verpreßt wurden die beiden Medien (handelsübliches Wasserglas, Bé 37/40, unverdünnt, $w_{WG} = 63,6 \%$ und konzentrierte CaCl_2 -Lösung) mit Hilfe einer Mohnopumpe. Zur Beobachtung der Druckverhältnisse beim Einpressen wurden die Verpreßdrücke unmittelbar an der Injektionsstelle registriert. Die Verpreßgeschwindigkeit und die verpreßten Volumina wurden mit einem induktiven Durchflußmesser erfaßt. Die hergestellten Stabilisierungskörper wurden nach Versuchsende vorsichtig ausgegraben und für eine Bilanzierung vermessen.

In dieser Versuchseinrichtung wurden verschiedene Einpreßversuche in unterschiedliche Probenmaterialien nach dem DRÄNSTAB-Verfahren durchgeführt.

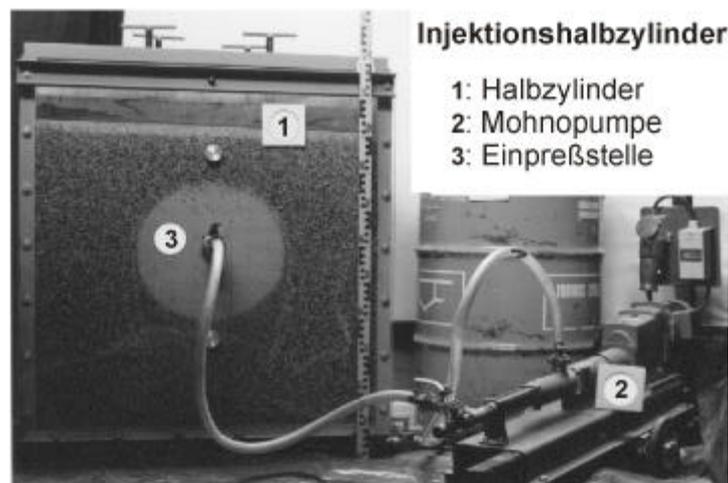


Abb. 7.12: Injektionshalbzylinder mit Plexiglasfrontscheibe (Abmessungen: $\bar{\Delta}$: 920 mm, Höhe: 1020 mm)

Für den hier beispielhaft beschriebenen Versuch (IT V2) wurde als Probenmaterial ein Grobsand verwendet, dessen Feldkapazität für Wasserglas ($w_{WG} = 63,6 \%$) zuvor zu $\text{FK} = 122 \text{ l/m}^3$ bestimmt

wurde; sein Porenanteil betrug $n = 0,37$, so daß sich ein Sättigungsgrad bei Feldkapazität von $S_{FK} = 32\%$ ergab. Die Ausgangsdurchlässigkeit des unverfestigten Materials lag bei $k_W = 9,4 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Mit Hilfe des Bemessungsdiagramms in Abb. 7.13 wurde die zur Stabilisierung einer Bodenschicht von 0,6 m Mächtigkeit (T) erforderliche Wasserglasmenge bestimmt. Der sich daraus ergebende Durchmesser des benetzten Bodenbereiches sollte ca. 0,3 m ($2 \cdot r$) betragen.

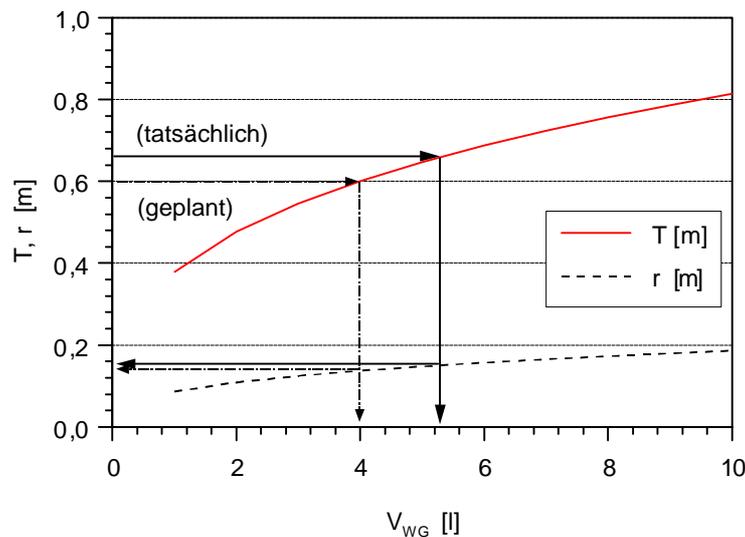


Abb. 7.13: Ermittlung des erforderlichen Wasserglasvolumens für den Laborversuch (IT V2) im Injektionshalbzylinder ($n = 0,37$; $FK = 122$ l/m³)

Da bei den Versuchen im Injektionshalbzylinder allerdings immer nur ein halber Stabilisierungskörper hergestellt wird, wäre eigentlich nur die Hälfte des ermittelten Wasserglasvolumens erforderlich. Da so geringe Mengen mit dem verwendeten Injektionssystem (Mohnpumpe, Schlauchsystem, etc) allerdings nur sehr schlecht handhabbar sind, wurde ein größeres Wasserglasvolumen (ca. 5 l) eingepreßt und in Kauf genommen, daß das überschüssige Wasserglas nach unten über die Drainschicht des Halbzylinders abläuft.

Um während des Einpressens eine kugelförmige Ausbreitung des Wasserglases bis $r = 0,15$ m (vgl. Abb. 7.13) überhaupt zu gewährleisten, war eine Einpreßrate von $Q \geq 0,20$ l/min erforderlich (vgl. Formel [1] u. Abb. 6.16). In dem hier beschriebenen Versuch wurde deshalb eine Einpreßrate

von $Q = 0,3 \text{ l/min}$ gewählt. Da bei einer solchen Einpreßrate nahe der Injektionsstelle mit Drücken von bis zu $p > 1,2 \text{ bar}$ gerechnet werden mußte (vgl. Abb. 7.14) und dadurch die Gefahr bestand, daß wegen der geringen Überlagerung im Injektionshalbzylinder Wegigkeiten zur Oberfläche hin aufreißen, wurde die Vertikalspannung (σ_v) durch Einspannung des Probenkörpers erhöht.

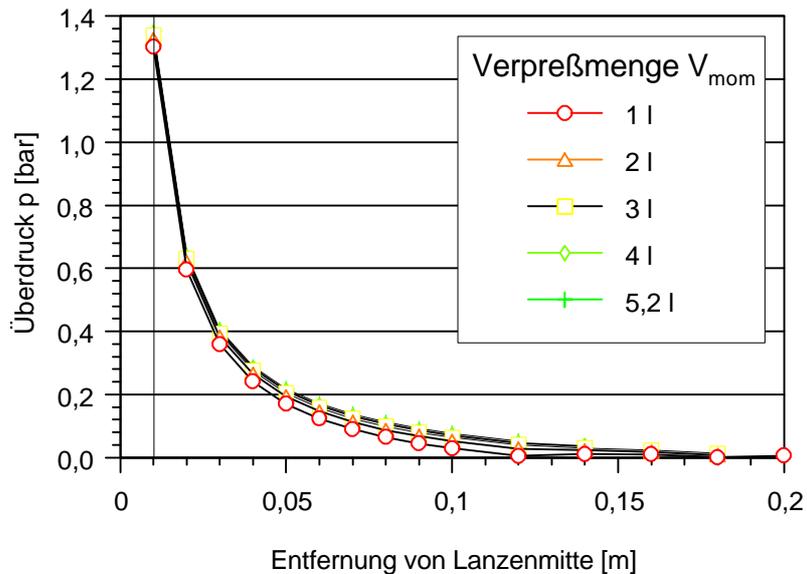


Abb. 7.14: Berechnete Porendrücke bei Versuch IT V2 im Injektionshalbzylinder bei konstanter Verpreßrate $Q = 0,3 \text{ l/min}$ (vgl. hierzu Kap. 5.4.2.6)

Die Einpreßzeit für das Wasserglas (1. Schritt) betrug ca. 16 Minuten (Abb. 7.15 - oben). Es zeigte sich zunächst eine kugel-radiale Ausbreitung des Wasserglases um die Injektionsstelle herum (Abb. 7.16, Abb. 7.17). Nach Abschalten der Pumpe breitete es sich erwartungsgemäß der Schwerkraft folgend nach unten aus und benetzte den darunter liegenden Bodenbereich.

Die Dauer für diese Ausbreitung (2. Schritt) wurde mit 60 Minuten festgelegt (vgl. Formel [8]). Da immer ein Rest der Wasserglaslösung in den Einpreßschläuchen bzw. in der Einpreßpumpe zurück bleibt wurde diese Zeitspanne auch dazu genutzt, das gesamte Schlauchsystem und die Pumpe mit Wasser zu spülen. Durch diese Maßnahme wird vermieden, daß eventuell im System zurückgebliebenes Wasserglas mit dem später nachgepreßten Härter reagiert und es infolge dessen zu einer Verstopfung kommt. Nach dem Ende der Ausbreitungsphase wurde im 3. Schritt konzen-

trierte CaCl_2 - Lösung im Überschuß (das 1,5-fache der Wasserglasmenge, d. h. ca. 8 l) verpresst. Die Verpreßzeit für den Härter betrug insgesamt ca. 12 Minuten (Abb. 7.15 unten). Die entsprechenden Druck-/Mengen-Diagramme können der Abb. 7.15 entnommen werden.

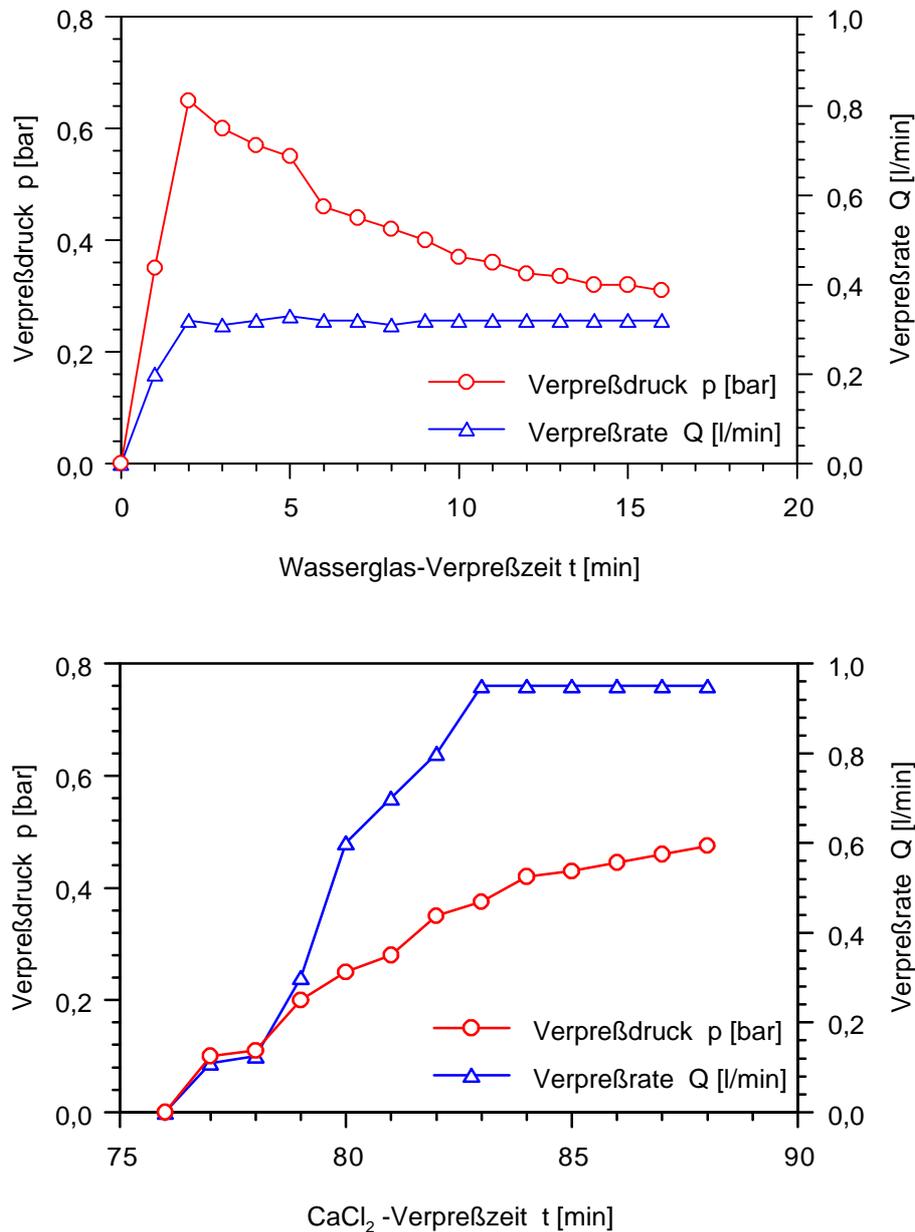


Abb. 7.15: Druckverlauf $[p]$ und Verpreßrate $[Q]$ bei Eingabe von Wasserglas (1. Injektionsphase - oben) und CaCl_2 - Härter (3. Injektionsphase - unten) zur Herstellung eines dränfähigen Injektionskörpers im Injektionshalbzylinder (hier: Versuch IT V2; Dauer der Ausbreitungsphase zwischen den beiden Injektionsschritten ca. 60 Minuten)

Die Einpreßrate für das CaCl_2 wurde kontinuierlich bis auf 0,9 l/min gesteigert. Um Störungen des Bodengefüges in der Nähe der Eingabestelle zu vermeiden, wurde die Verpreßrate bei beiden Einpreßvorgängen langsam gesteigert (Abb. 7.15).

Wie die Darstellung der Verpreßdrücke zeigt (Abb. 7.15 oben), kommt es nach einem anfänglichen, schnellen Druckanstieg zu einer langsamen, kontinuierlichen Abnahme des Druckes. Diese Druckabnahme ist anfänglich etwas schneller, wird dann aber zunehmend langsamer und stabilisiert sich. Diese Druckabnahme kann darauf zurückgeführt werden, daß es durch das Einpressen des zähen Wasserglases zu einer Aufweitung des Porengefüges nahe der Einpreßstelle kommt. Eventuell kommt es in diesem Fall auch noch zu einer leichten Vorwölbung der Plexiglas-Frontscheibe des Injektionshalbzylinders.

Das später injizierte CaCl_2 ist wesentlich weniger zäh, so daß dort (Abb. 7.15 unten) keine Gefügaufweitung mit Druckabfall festgestellt werden konnte. Dort steigt der Druck nach Erreichen einer konstanten Einpreßrate weiter an. Dieser weitere Anstieg hat den positiven Effekt, daß dadurch ggf. auch noch solche Stellen im Porenraum, aus denen das Wasserglas noch nicht vollständig (d. h. bis zur Feldkapazität) abgelaufen ist, vom CaCl_2 fingerförmig durchdrungen werden können. Auf diese Weise kann auch noch in diesen Bereichen eine gewisse Durchlässigkeit erzeugt werden.

Nach Herstellung der Injektionshalbkörper wurden diese jeweils sorgfältig freigelegt (Abb. 7.16 und Abb. 7.17) und vermessen (Abb. 7.18).

Im oberen Bereich, um die Injektionsstelle herum, zeigten alle eine kugelig-radiale Ausbreitung und Verfestigung. Nach unten gingen die Körper wie erwartet in eine zylindrische Form über. Auffällig war bei allen die mehr oder weniger deutlich ausgeprägte „Finger“-Bildung in den unteren Bereichen der verfestigten Bodensäulen. Dieses Phänomen konnte an den hier gezeigten Stabilisierungskörpern sehr deutlich erkannt werden (Abb. 7.16, Abb. 7.17). Die „Finger“ bestanden aus verfestigten, z. T. miteinander verflochtenen Strängen, zwischen denen stellenweise unverfestigtes Material eingeschlossen war.

Auch wurden die verfestigten Bodensäulen nach unten insgesamt etwas schlanker. Im Fall des hier beschriebenen Versuches wies die stabilisierte Bodensäule gegenüber einem Durchmesser von ca. 0,4 m im oberen Bereich unten nur noch einen Durchmesser von ca. 0,32 m auf und entsprach damit den prognostizierten Abmessungen.

Die etwas schlankere Ausbildung des Stabilisierungskörpers im unteren Bereich ist auf das „Fingering“-Phänomen zurückzuführen, bei dem das Wasserglas bevorzugt – und mit der Tiefe zunehmend – auf einzelnen Bahnen nach unten abströmt und sich deshalb nicht mehr lateral weiter ausbreitet.

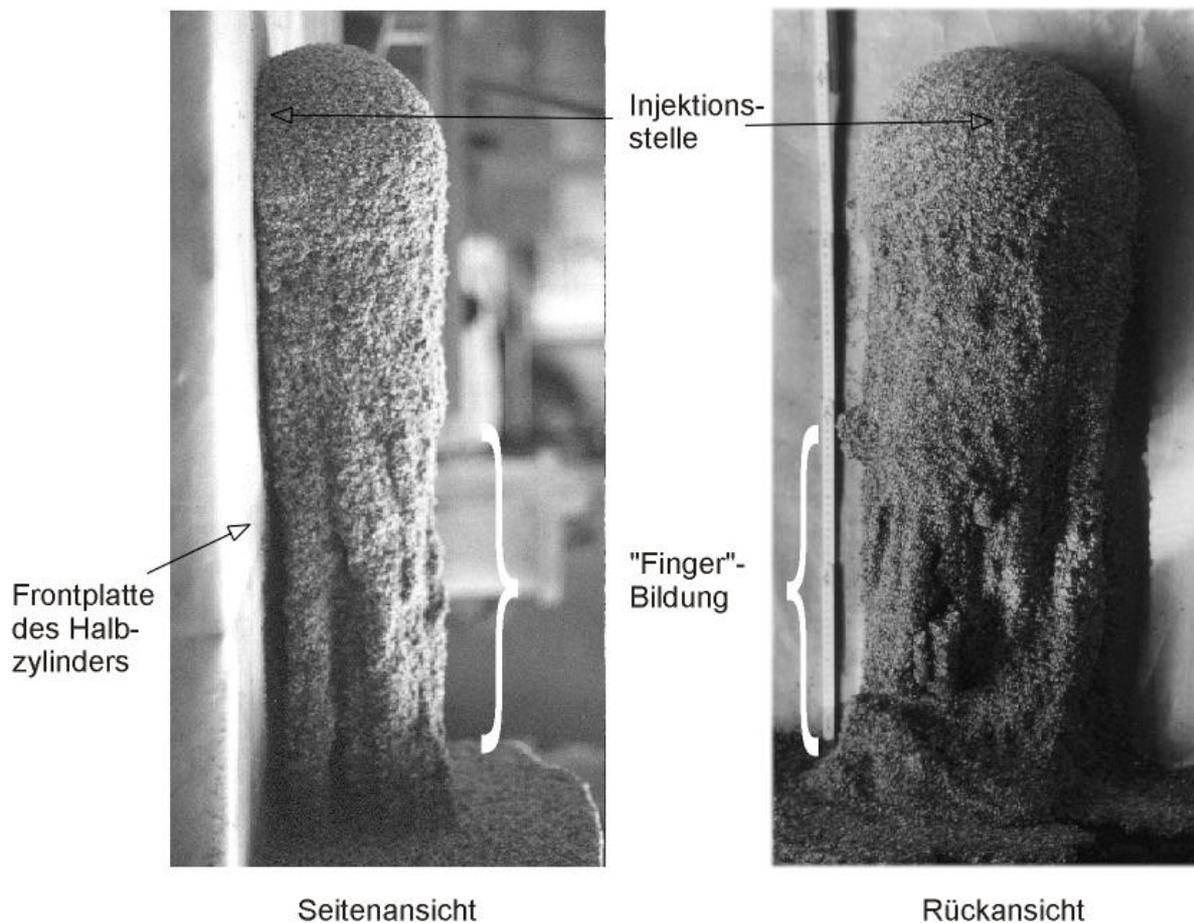


Abb. 7.16: Beispiele für einen Injektionskörper, hergestellt im Injektionshalbzylinder



Abb. 7.17: Weitere Beispiele für Injektionskörper mit „Finger“-Bildung

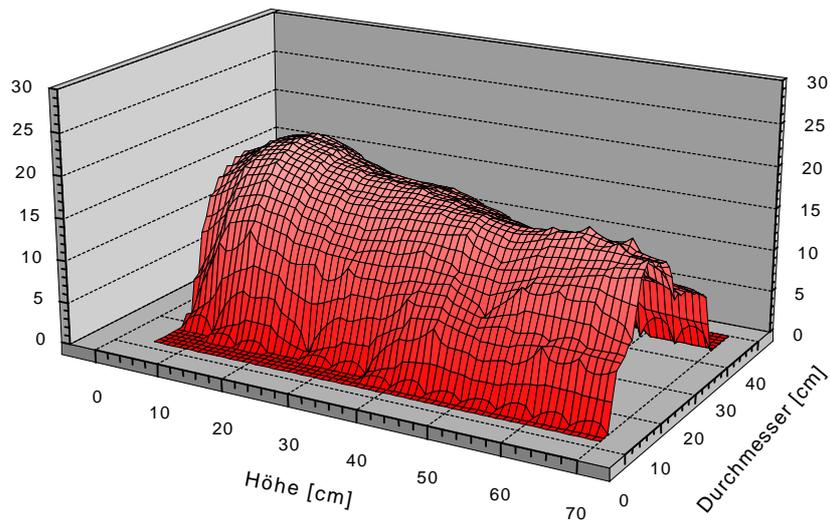


Abb. 7.18: 3D-Darstellung als Ergebnis der Vermessung eines Stabilisierungskörpers; liegende Fläche entspricht dabei der Plexiglas-Frontscheibe; Verpreßstelle bei Koordinaten 30/15 (V_{WG} : 4,8 l; V_{CaCl_2} : 8 l; $n = 0,37$; FK : 122 l/m³)

Die Vermessung ergab für den stabilisierten Bodenkörper eine Gesamthöhe (T) von ca. 0,66 m, einen oberen Durchmesser von 0,40 m und einen unteren von 0,32 m. Daraus ergibt sich ein Volumen von ca. 33,5 l. Aufgrund der größeren eingepreßten Wasserglasmenge (4,8 anstatt 4,0 l) war der Stabilisierungskörper auch entsprechend größer als geplant (Abb. 7.13). Bei einer Ausgangsporosität des verwendeten Materials von $n = 0,37$ und einem tatsächlich eingepreßten Wasserglasvolumen von ca. 4,8 l ergibt sich bei diesem Versuch eine - auf den Gesamtkörper bezogene - durchschnittliche rechnerische Porensättigung von ca. 39 %, die etwas über dem Sättigungswert bei Feldkapazität ($S_{FK} = 32 \%$) liegt.

Wie bereits erwähnt, hat das Wasserglas den Boden nicht gleichmäßig durchströmt, sondern es hat sich auf einigen Bahnen bevorzugt ausgebreitet, wohingegen an einigen Stellen kein Wasserglas angereichert werden konnte, so daß im zylindrischen Bereich des stabilisierten Bodenkörpers keine gleichmäßige Porensättigung erzielt wurde.

Des weiteren konnte festgestellt werden, daß einige Randbereiche des Injektionskörpers, die beim Ausbau zunächst verfestigt schienen, beim Einlegen des Körpers in Wasser mit der Zeit zerfielen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in diesen äußeren Bereichen das Wasserglas nicht vollständig mit dem Härter in Kontakt und zur Reaktion kam und sich deshalb kein wasserunlösliches Silikatgel bilden konnte.

Zur Bestimmung der Durchlässigkeit wurden aus dem verfestigten Körper Proben herausgearbeitet und diese in einen enganliegenden Gummischlauch eingebaut und durchströmt. Die Durchlässigkeit des Injektionskörpers war mit $k = 5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s im Vergleich zu $k = 9,4 \cdot 10^{-3}$ m/s vor der Injektion nur um Faktor $\alpha = 0,057$ verringert und als noch ausreichend gut zu bezeichnen. Auch die erzielte Verfestigung war ausreichend, da der behandelte Bodenkörper nach Ausbau frei stehen blieb und auch nach einer Wasserlagerung von mehreren Monaten noch verfestigt war.

Als Ergebnis dieser Versuche im Injektionshalbzylinder kann zusammenfassend festgestellt werden:

- Die auf der Grundlage der theoretischen Überlegungen vorgestellte Methode zur Bemessung des Stabilisierungskörpers hat sich bei den Versuchen weitgehend bestätigt.

- Die behandelte Bodenschicht wird nicht über die gesamte Höhe (T) gleichmäßig stabilisiert.
- Der Härter kommt nicht überall mit dem Wasserglas in Kontakt, besonders nicht in den Randbereichen der Wasserglasbenetzung.
- Das DRÄNSTAB-Verfahren ist auch in technischem Maßstab durchaus anwendbar.

7.1.2.2 Versuch an einer Großprobe mit 3 Verpreßstellen

Zum Abschluß der Laborversuche sollte eine Großprobe mit drei Einpreßstellen möglichst vollständig stabilisiert werden. Da dieser Versuch auch zur Vorbereitung eines abschließenden Feldversuches diente, wurde die Probe aus Material vom Standort des späteren Feldversuches aufgebaut. Außerdem sollten in diesem Großversuch die eingangs aufgestellten Überlegungen zur Druckentwicklung im Porenraum überprüft werden. Weiterhin sollten auch Erkenntnisse darüber gesammelt werden, auf welche technischen Faktoren beim praktischen Einsatz des Verfahrens besonders zu achten ist.

Die Großprobe hatte einen Durchmesser von 0,80 m und eine Höhe von 0,97 m. Als Versuchsbehälter wurde ein Stahlzylinder gewählt, der, um Verunreinigungen des Labors durch eventuell auslaufende Injektionsmittel zu vermeiden, in eine Schuttmulde gestellt wurde (Abb. 7.19).

Verpreßt wurde wiederum mit Hilfe einer Mohno-Pumpe. Während des Versuches wurden die Verpreßraten und verpreßten Volumina mittels eines induktiven Durchflußmessers, der Verpreßdruck mit einem Manometer erfaßt (Abb. 7.19). Zur Erfassung der Porendrucke wurden Piezometerröhrchen in die Probe mit eingebaut. Diese wurden in einer Ebene der Probe in Entfernungen von 6, 12, 18, 24 und 30 cm von der Eingabestelle 2 bzw. 2* eingebaut und mit einer Piezometerharfe direkt abgegriffen.

Der Laborversuch mit der Großprobe sollte auch Fragen der Einpreßtechnik klären helfen, die aus der schnellen Reaktion der beiden Injektionsmittel miteinander resultieren. Prinzipiell am vorteilhaftesten wäre die Verpressung der beiden Komponenten (Wasserglas und Härter) mit völlig voneinander getrennten, nacheinander installierten Einpreßsystemen. Da eine solche Lösung

gewöhnlich aus Kostengründen ausscheidet, kommt es darauf an, die Einpreßtechnik so zu gestalten, daß insbesondere die 2. Komponente (Härter) noch ausreichend gezielt eingebracht werden kann, ohne daß das System alsbald ganz oder teilweise verstopft.

Wie erwähnt wurde die Probe aus Material vom Standort des späteren Feldversuches hergestellt. In Abb. 7.21 ist die typische Kornzusammensetzung des Materials dargestellt. Es handelt sich um einen sandigen Mittel- Feinkies mit geringen Grobkies- und Schluffanteilen, in den Leerkieslagen eingeschaltet waren. Die Ungleichförmigkeit betrug $U = 29$. Im Bereich zwischen 0,6 und 2 mm wies das Material eine Ausfallkörnung auf.

Wie die Beurteilung nach dem Suffosionskriterium von BURENKOVA (1993), vgl. SCHULER (1993) ergab, ist dieses Material als suffosionsanfällig zu bezeichnen und daher in dieser Hinsicht ein gutes Beispielmateriale für eine Anwendung des DRÄNSTAB-Verfahrens.

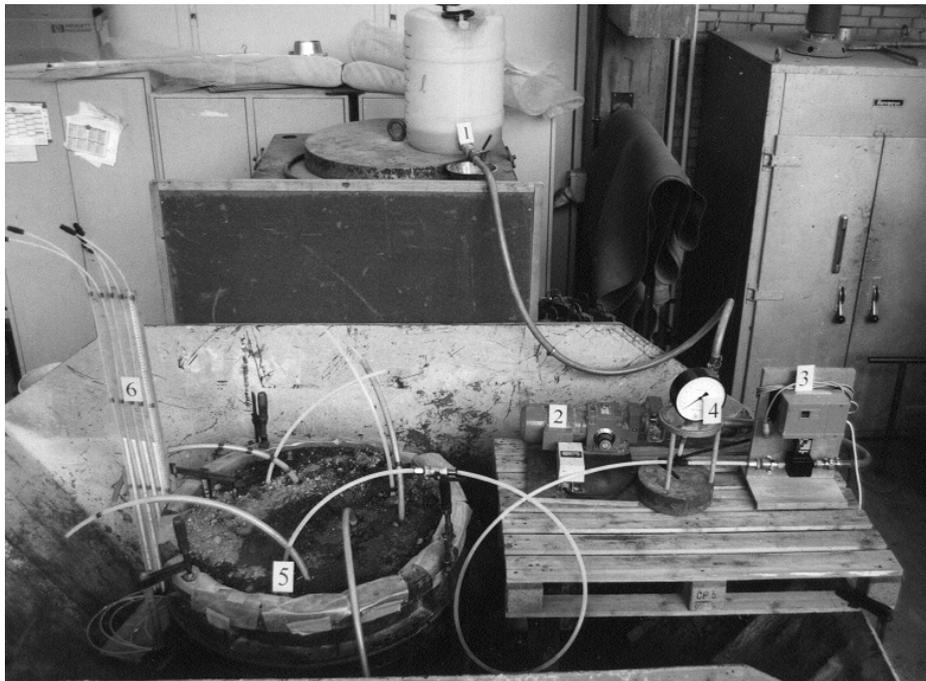
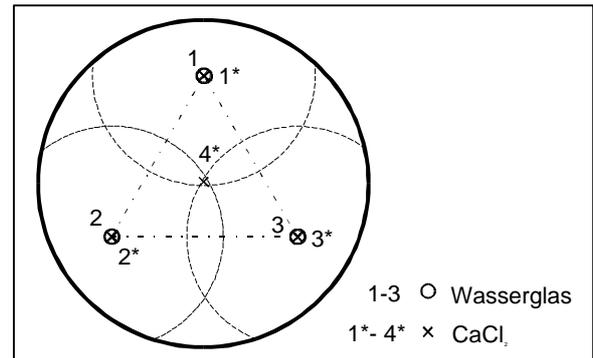


Abb. 7.19: Aufbau des Großversuches mit 3 Verpreßstellen (Probendurchmesser: 0,80 m)

- | | | | |
|-----|-------------------------------|-----|---------------------|
| (1) | Behälter für Injektionsmedium | (4) | Manometer |
| (2) | Mohno-Pumpe | (5) | Verpreßschläuche |
| (3) | Induktiver Durchflußmesser | (6) | Piezometerschläuche |

Abb. 7.20: Probenbehälter des Großversuches im Labor. (Durchmesser: 0,80 m, Höhe: 0,97 m, Abstand der Eingabestellen 1 – 3: 0,45 m). Anordnung der Verpreßstellen (Wasserglas: 1 – 3; CaCl_2 : 1* – 4*)



Der Probenkörper wurde lagenweise aufgebaut. Die dabei erzielte Dichte lag mit $\rho = 2,04 \text{ g/cm}^3$ noch etwas über der natürlichen Dichte ($\rho = 1,96 \text{ g/cm}^3$). In Anlehnung an die Verhältnisse vor Ort wurde in der Großprobe in 0,52 m Tiefe unter Probenoberkante ebenfalls eine ca. 3 cm mächtige Leerkieslage mit eingebaut.

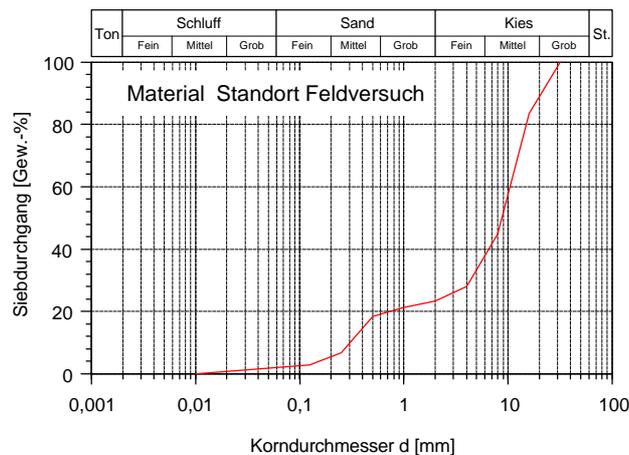


Abb. 7.21: Kornverteilung des Materials vom Standort des späteren Feldversuches ($U = 29$)

Um die Probe möglichst vollständig zu stabilisieren, wurden 3 Verpreßschlauchpaare (jeweils einer für Wasserglas und CaCl_2) so eingebracht, daß sie ein gleichseitiges Dreieck mit 0,45 m Seitenlänge bildeten (Abb. 7.20). Zusätzlich wurde noch in der Mitte dieses Dreiecks ein einzelner Verpreßschlauch (4*) für CaCl_2 mit eingebaut, um zu gewährleisten, daß der Härter möglichst den gesamten mit Wasserglas benetzten Boden erreicht.

Das Einbringen der Verpreßschläuche erfolgte mit Hilfe von Stahlrohren (\varnothing 25 mm) mit verlorener Spitze, die nach dem Einrammen und Einführen des Verpreßschlauches und unmittelbar vor dem Ziehen des Rohres abgeschlagen werden konnte. Das Rohr wurde dann über den Schlauch herausgezogen. Der dabei entstehende Spalt wurde mit feinerem Material sorgfältig gefüllt und verdichtet, im oberen Bereich wurden die Verpreßschläuche mit Schnellzement eingedichtet.

Für die Eingabe der Einpreßmedien wurden Polyamid-Verpreßschläuche verwendet (Abb. 7.23, getrennt für Wasserglas und CaCl_2 ; Anordnung s. Abb. 7.20). Diese hatten einen Innendurchmesser von 10 mm. Das Wasserglas konnte jeweils nur am Ende des Schlauches, das CaCl_2 über Verpreßabschnitte unterschiedlicher Längen austreten (Abb. 7.22).

Die Verpreßebene für das Wasserglas lag jeweils in - 0,40 m Tiefe unter Probenoberfläche (vgl. Abb. 7.22). Dagegen wurden für die Verpreßschläuche des Calciumchlorids verschiedene Einbindelängen und unterschiedlich lange Verpreßabschnitte gewählt (Abb. 7.22). Die Verpreßschläuche 2*-4* wurden bis auf -0,80 m eingebracht, der Verpreßschlauch 1* nur bis - 0,30 m Tiefe. Bei den Verpreßschläuchen 2* und 4* waren die Verpreßabschnitte jeweils 0,60 m lang und reichten von -0,20 m bis -0,80 m unter Probenoberfläche. Der Schlauch 3* wurde während des Verpressvorgangs kontinuierlich gezogen. Diese Variationen in der CaCl_2 -Eingabe sollten – wie auch das zusätzliche Einbringen eines 4. Härtereinpreßschlauches (4*) im Zentrum der drei Doppel-Einpreßstellen - dazu dienen, festzustellen, welche Methode am besten geeignet ist, das Calciumchlorid möglichst überall mit dem im Boden verbliebenen Wasserglas in Kontakt und damit zur Reaktion zu bringen. Zusätzlich wurden sämtliche Calciumchlorid-Verpreßschläuche mit Schutzschläuchen überzogen, die verhindern sollten, daß Wasserglas aus dem ersten Injektionsschritt in diese Schläuche eindringen und sie verstopfen konnte. Diese Schutzschläuche wurden unmittelbar vor der Härterzugabe abgezogen.

Die erforderlichen Mengen an Wasserglas je Verpreßstelle wurden mit Hilfe der bereits erläuterten Bemessungsdiagramme ermittelt. Da in diesem Versuch besonders auch die Ausbildung eines Überschneidungsbereiches einzelner Verpreßkörper untersucht werden sollte, wurde etwas mehr

Wasserglas verpreßt, als eigentlich für die Ausbildung von 3 einzelnen, sich nur berührenden Stabilisierungskörpern erforderlich war.

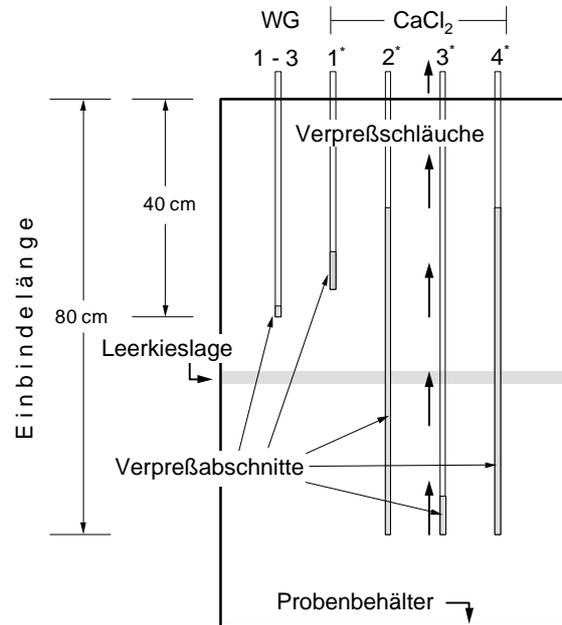


Abb. 7.22: Schemaskizze über die Einbaulänge der Injektionsschläuche und die Länge der Verpreßstrecken (1 – 3: Wasserglaseinpreßschläuche, 1* - 4*: CaCl_2 -Einpreßschläuche)

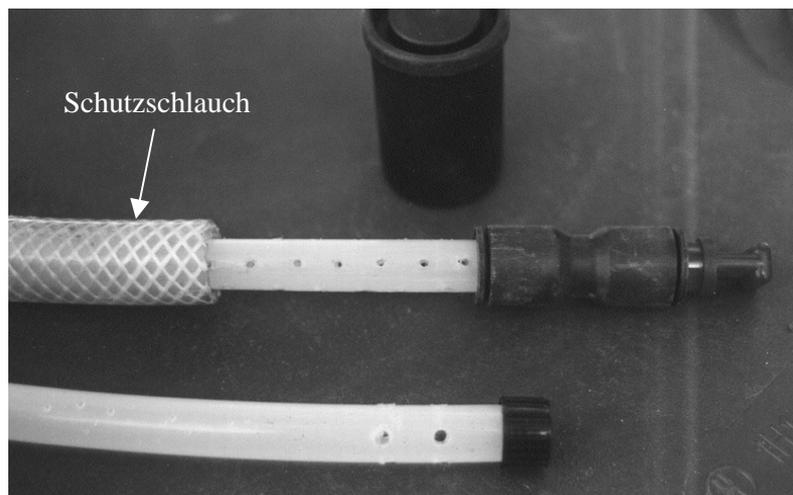


Abb. 7.23: Verpreßschläuche für Calciumchlorid (oben) und Wasserglas (unten)

Anstatt des erforderlichen Mindestdurchmessers von 0,45 m ($r = 0,225$ m) wurde Wasserglas für jeweils einen Stabilisierungskörper mit 0,54 m Durchmesser ($r = 0,27$ m) verpreßt. Damit ergibt sich rechnerisch ein Überschneidungsbereich zwischen den einzelnen Verpreßkörpern von ca. 5 cm und eine erforderliche Wasserglasmenge von 22 l je Eingabestelle. Die damit zu erreichende Tiefenwirkung beträgt bei dem vorliegenden Bodenmaterial etwa 0,4 m (s. Abb. 4.19).

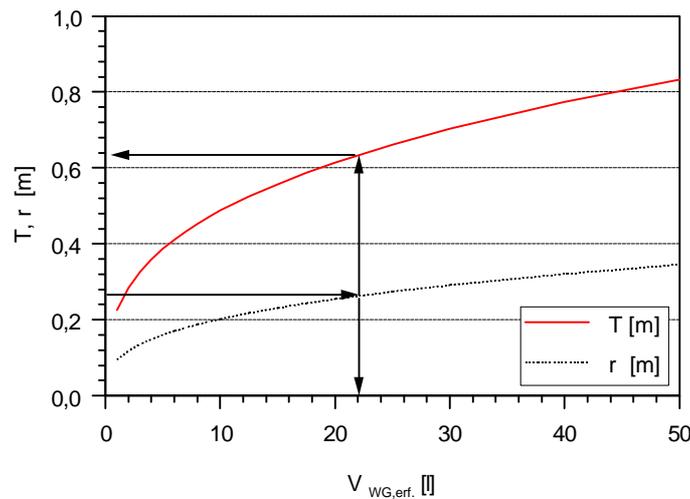


Abb. 7.24: Ermittlung der erforderlichen Wasserglas-Verpreßmenge je Eingabestelle für den Großversuch: $V_{WG,erf.} = 22$ l/Eingabestelle; $r = 0,27$ m; Bodenparameter: $n = 0,29$
 $FK_{WG} = 186$ l/m³

Das Wasserglas wurde nacheinander über die 3 Lanzen eingegeben. In den Abb. 7.25 und Abb. 7.26 ist die Entwicklung des Verpreßdruckes und der Verpreßrate dargestellt.

Zu Beginn der Wasserglaseinpressung zeigte sich ein schneller Druckanstieg, der nach Erreichen eines Maximums bei ca. 1,15 bar kontinuierlich bis Verpreßende wieder abnahm. Der entsprechende Durchfluß erhöhte sich schnell und wurde bis Eingabeende auf einem konstanten Wert von knapp 0,4 l/min gehalten.

Es zeigte sich (Abb. 7.25) eine den Versuchen im Injektionshalbzylinder vergleichbare Druckentwicklung. Auch in diesem Fall kommt es bei der Wasserglaseinpressung nach einem schnellen Druckanstieg zu einem zunächst etwas schnelleren, dann aber sich verlangsamen Druckabfall.

Wie ein Vergleich des Druckes in der Injektionslanze mit den über die Piezometer ermittelten Porendrücke ergibt (Abb. 7.27), liegt beim Einpreßvorgang im Nahbereich der Lanze ein sehr hoher Druckgradient vor. Dieser hohe Druckgradient kann im Einpreßbereich zu einer Aufweitung des Bodengefüges führen und dadurch den beobachteten Druckabfall bedingen.

Die für die Gelbildung erforderliche konz. CaCl_2 -Lösung wurde nach einer Ausbreitungszeit von 2 Stunden nacheinander über die Verpreßstellen 1* - 4* eingegeben. Der Schlauch der Verpreßstelle 3* wurde dabei kontinuierlich gezogen. Der Durchfluß wurde bis auf $Q = 1,1$ l/min gesteigert. Der dabei registrierte Verpreßdruck zeigt – wie bereits im Halbzylinderversuch - ein langsames aber kontinuierliches Ansteigen (Abb. 7.26); bis zum Versuchsende stellte sich kein konstanter Wert ein.

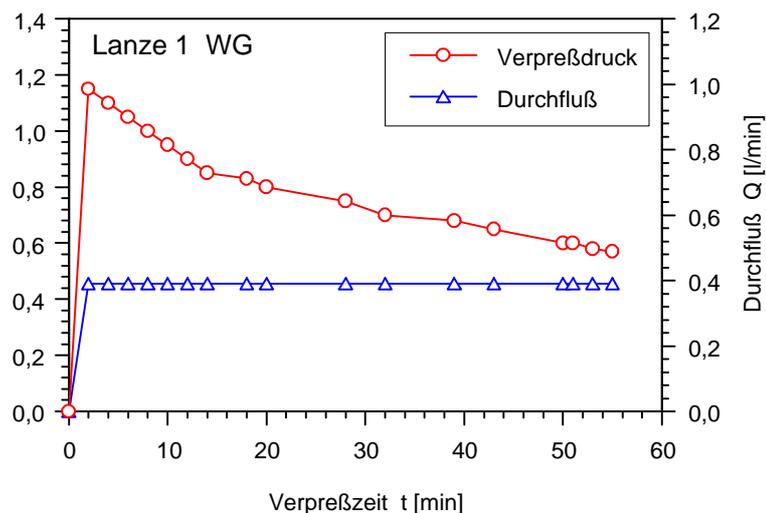


Abb. 7.25: Entwicklung von Verpreßdruck (p) und Durchfluß (Q) während der Verpressung von Wasserglas über Schlauch 1 (vgl. Abb. 7.20)

Diese Entwicklung, die ebenfalls bereits im Versuch im Injektionshalbzylinder festgestellt werden konnte, deutet darauf hin, daß mit zunehmender Verpreßzeit mehr und mehr Wasserglas mit CaCl_2 reagiert, und infolge der Gelbildung die Porenräume verengt werden, was die Durchlässigkeit des Bodens und damit den Fließwiderstand naturgemäß insgesamt erhöht. Das weiter eingepreßte CaCl_2 muß dann einen größeren Widerstand überwinden, um weiter vorzudringen. Zudem muß die Härterlösung eventuell noch vom Wasserglas besetzte Porenengstellen penetrieren.

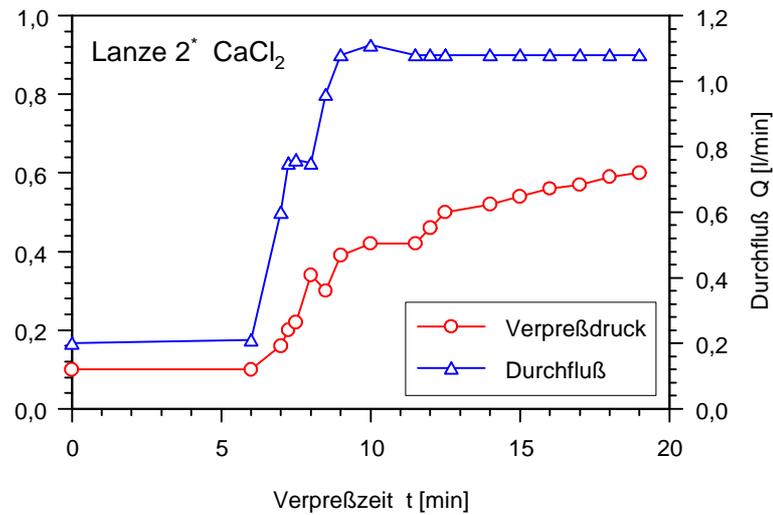


Abb. 7.26: Entwicklung von Verpreßdruck (p) und Durchfluß (Q) während der Verpressung von CaCl_2 über Schlauch 2*

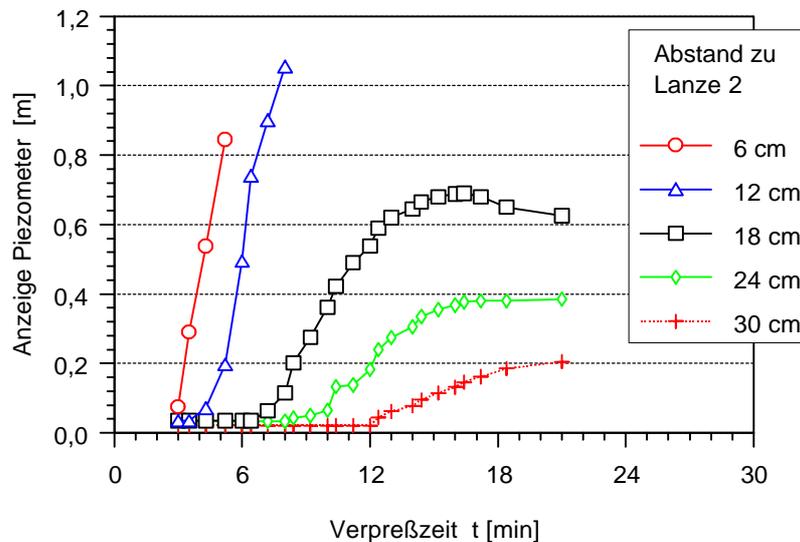


Abb. 7.27: Entwicklung der Druckhöhen in den eingebauten Piezometerröhrchen bei Wasserglasverpressung ($Q = 0,4 \text{ l/min}$) über Eingabestelle Lanze 2

In Abb. 7.27 ist die zeitliche Entwicklung des Druckes in den einzelnen Piezometerröhrchen beim Einpressen von Wasserglas über den Verpreßschlauch 2* dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, daß der Porendruck nahe der Eingabestelle zuerst und rasch bis auf Werte von ca. 0,1 bar ansteigt,

während die Piezometer in größerer Entfernung von der Eingabestelle entsprechend später reagieren, langsamer steigen und auch geringere absolute Drücke anzeigen.

Eine Auftragung der berechneten Porendrücke in den einzelnen Piezometern zu unterschiedlichen Zeitpunkten ist in Abb. 7.28 dargestellt. Entsprechend den eingangs dargelegten grundsätzlichen Überlegungen zur Druckentwicklung im Porenraum beim Verpressen einer Flüssigkeit kann anhand der in Abb. 7.29 dargestellten Gegenüberstellung der berechneten mit den gemessenen Porendrücken eine recht gute Übereinstimmung festgestellt werden.

Die in der Probe gemessenen Drücke nehmen im Vergleich mit den berechneten Werten mit zunehmender Entfernung von der Eingabestelle langsamer ab. In den Meßpunkten nahe der Eingabestelle liegen die berechneten Werte dabei jeweils deutlich über den gemessenen, während es sich in den entfernteren Meßpunkten umgekehrt verhält.

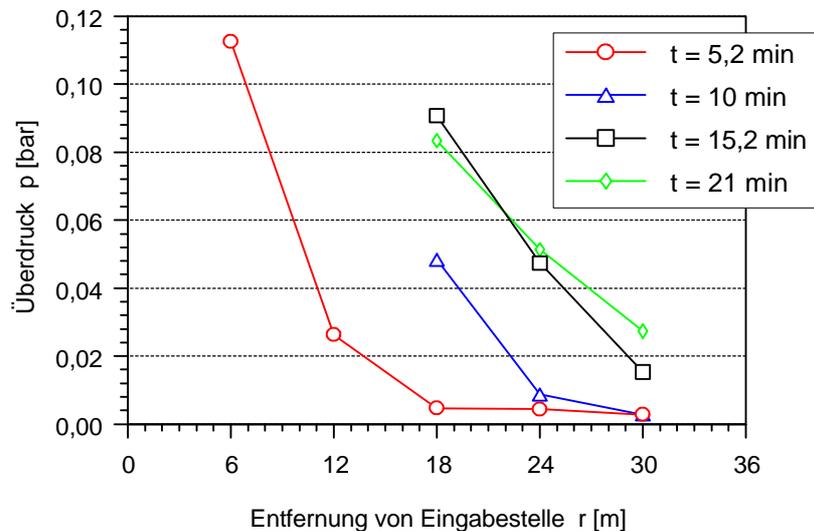


Abb. 7.28: Entwicklung des Porendruckes beim Verpressen von Wasserglas ($Q = 1$ l/min) über Eingabestelle Lanze 2

Nach Entfernen des stählernen Probenbehälters blieb die Probe frei stehen. Der stabilisierte Bodenkörper wurde mit Schaufel, Spachtel und unter Verwendung von Druckluft und eines feinen

Wasserstrahls freipräpariert. Er hatte im wesentlichen eine zylindrische Form, was darauf zurückzuführen ist, daß die beiden Injektionsmedien in ihrer radialen Ausdehnung durch die Behälterwand gehindert wurden und sich dort entlang ausbreiteten konnten. Bei freier Ausbreitung wäre eine etwas größere seitliche Ausbreitung möglich gewesen, und der Probenkörper hätte keine derart ausgeprägt zylindrische Form angenommen.

Die Abb. 7.30 zeigt den freigelegten Probenkörper nach Entfernung der nicht verfestigten Teile. Diese waren besonders am äußeren Rand des Gesamtkörpers anzutreffen und zwar besonders in den Zwickeln zwischen den einzelnen stabilisierten Erdstoffkörpern.

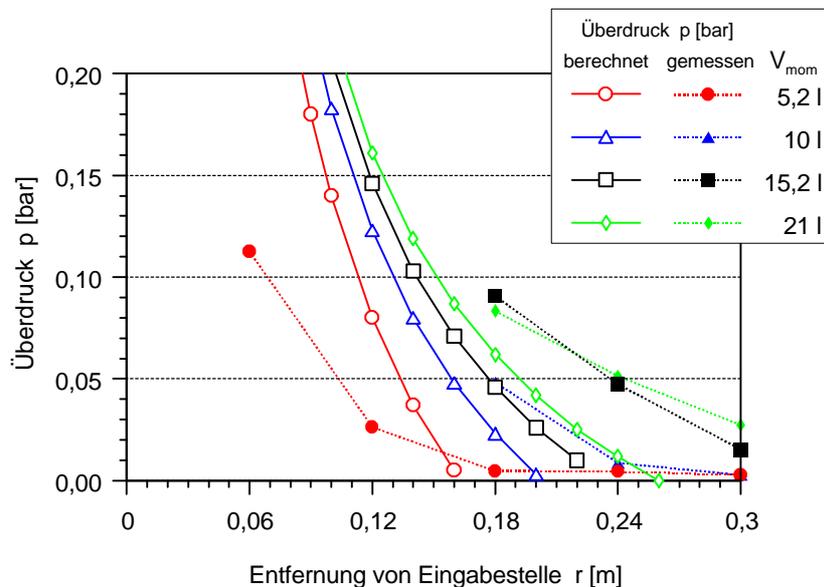


Abb. 7.29: Vergleich der berechneten mit der in den Piezometern gemessenen Überdruckentwicklung im Porenraum der Probe, beim Verpressen von Wasserglas, in Abhängigkeit von dem verpreßten Wasserglasvolumen und der Entfernung von der Eingabestelle 2

Insgesamt läßt sich feststellen, daß der Injektionskörper ab $\sim 0,40$ m unter der Oberfläche eine zylindrische Form hat. Das Wasserglas hatte sich bis ca. 20 cm nach oben unter der Probenoberfläche ausgebreitet. Die säulenförmigen Verfestigungen oberhalb von 20 cm waren auf Wegigkeiten entlang der Verpreßschläuche zurückzuführen.

In der Verpreßebene (bei - 0,40 m) wurden um die Eingabestellen jeweils Reichweiten von 0,25 - 0,30 m erzielt, was auch der erwarteten Ausdehnung entsprach. Die eingebaute Leerkieslage wurde ebenfalls verfestigt, und eine visuelle Betrachtung ergab eine bevorzugte Anreicherung des Gels in den Porenwickeln.



Abb. 7.30: Freipräparierter Injektionskörper aus Laborversuch mit 3 Eingabestellen

Im Inneren des Gesamtkörpers konnte ebenfalls eine gute Verfestigung erzielt werden, was auch auf die zusätzliche Härter-Eingabestelle (4^{*}) in der Mitte des Probenkörpers zurückgeführt werden kann. Insgesamt wies der Körper eine sehr homogene Festigkeitsverteilung auf. Dabei dürfte die Leerkieslage zu einer gleichmäßigen Verteilung der Injektionsmedien über die gesamte Probenbreite beigetragen haben.

Hinsichtlich der Methode der CaCl_2 -Verpressung waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei stabilisierten Bodenkörpern festzustellen. Auch durch das Ziehen des Verpreßschlauches (3*) während der Härterzugabe ergaben sich keine Unterschiede zu den anderen Methoden.

Die Restdurchlässigkeit des behandelten Bodenmaterials wurde näherungsweise mittels Bohrlochversickerungsversuchen bestimmt. Nach der Formel von BENNER (1991) ergab sich eine verbliebene Durchlässigkeit von $k = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s, was nach DIN 18130 als durchlässig bezeichnet wird. Die ursprüngliche Durchlässigkeit hatte $k = 5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s betragen, so daß sich durch die Behandlung eine Verringerung um etwa den Faktor 0,1 ergab. Dies entspricht der Durchlässigkeitsverringerng, wie sie in den Versuchen an den Bodenelementen erzielt wurden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der nach dem DRÄNSTAB-Verfahren behandelte Bodenkörper noch eine bedeutsame Restdurchlässigkeit und eine für den beabsichtigten Zweck völlig ausreichende Festigkeit aufweist. Für das Verpressen des Härters ergab sich, daß es nicht erforderlich ist, den Verpreßschlauch währen des Einpressens zu ziehen. Am besten geeignet erscheinen hier die langen Verpreßabschnitte (2* und 4*). Als sehr günstig für das Behandlungsergebnis hat sich allerdings das Einbringen einer 4. Verpreßstelle (4*) im Zentrum des Dreiecks erwiesen. Diese bewirkte, daß der Injektionskörper auch in seinem Inneren verfestigt war. Bei einem üblicherweise in einem Dreieckraster anzuordnenden Injektionsraster sollte demnach immer im Zentrum des Dreiecks zusätzlich eine Härter-Verpreßstelle vorgesehen werden.

7.1.2.3 Visualisierung der Wirkung des DRÄNSTAB-Verfahrens

Zusätzlich zu den bisher durchgeführten Untersuchungsmethoden (z. B. Durchlässigkeit, etc.) konnte mit Hilfe von stark vergrößernden, mikroskopischen Aufnahmen des Korngefüges der behandelten Probenkörper die stabilisierende Wirkung des DRÄNSTAB-Verfahrens sehr deutlich dokumentiert werden.

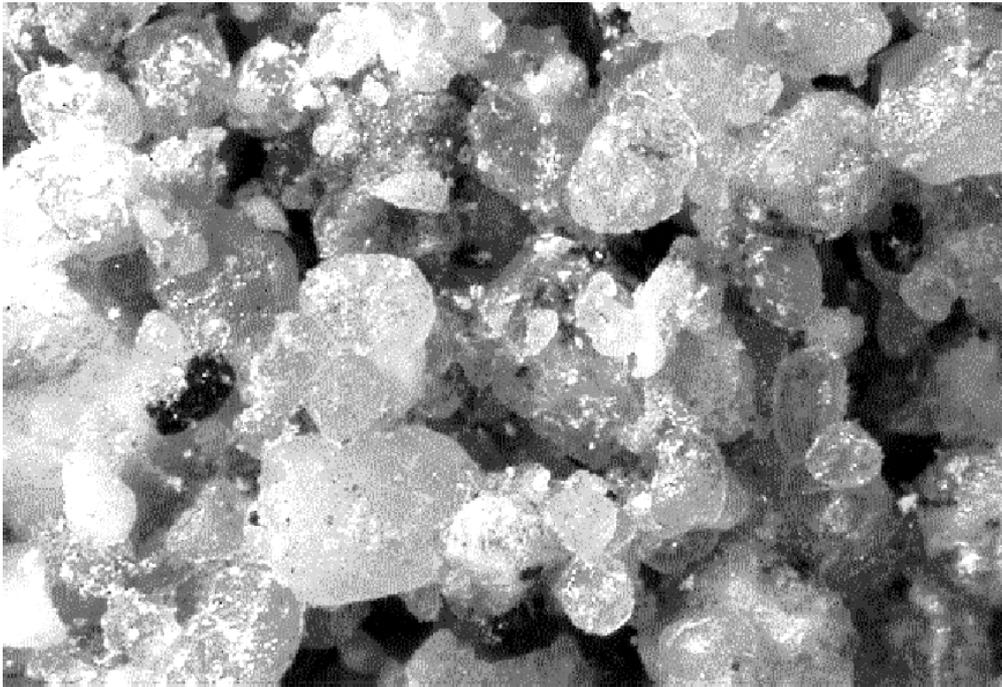


Abb. 7.31: Mikroskopische Aufnahme des Korngefüges des im Großversuch stabilisierten Bodenkörpers (Vergrößerung : ca. 3-fach)

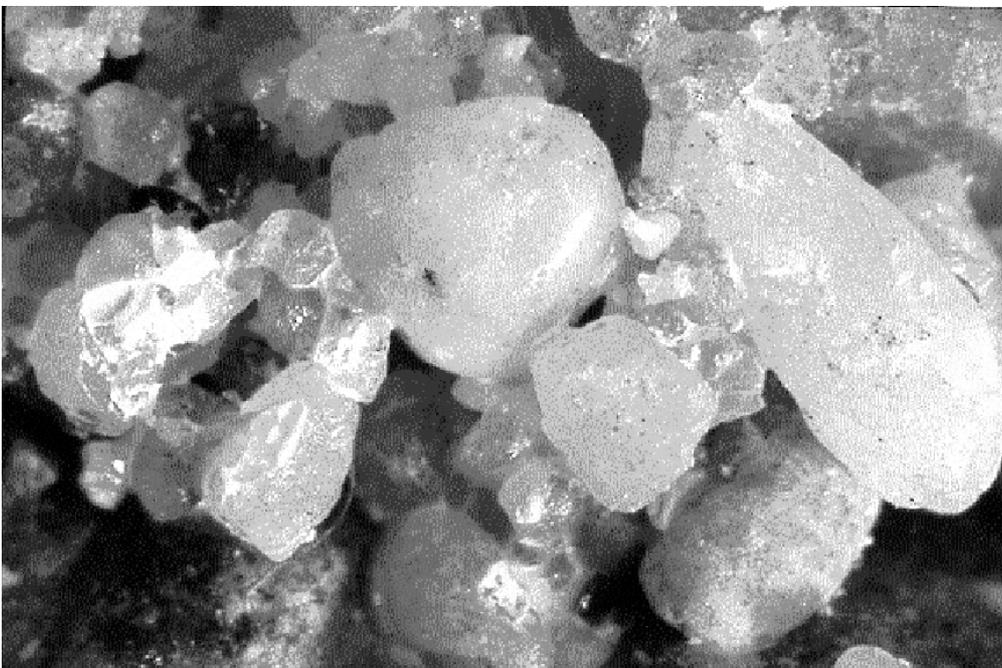


Abb. 7.32: Mikroskopische Aufnahme des Korngefüges des im Großversuch stabilisierten Bodenkörpers (Vergrößerung : ca. 5-fach)

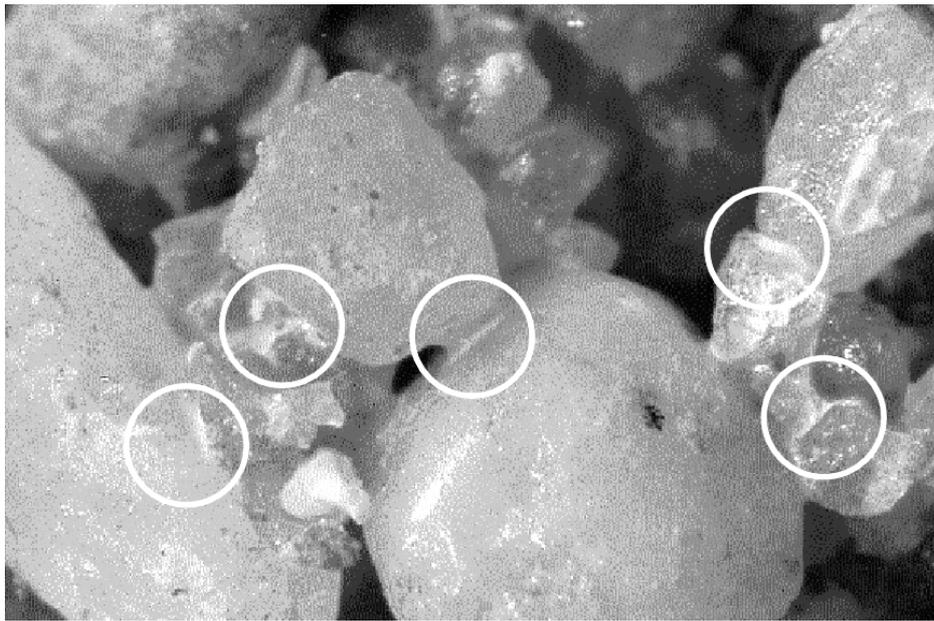


Abb. 7.33: Mikroskopische Aufnahme des Korngefüges des im Großversuch stabilisierten Bodenkörpers. Mit Silikatgel stabilisierte Kornkontakte sind durch Kreise markiert. (Vergrößerung: ca. 6-fach)

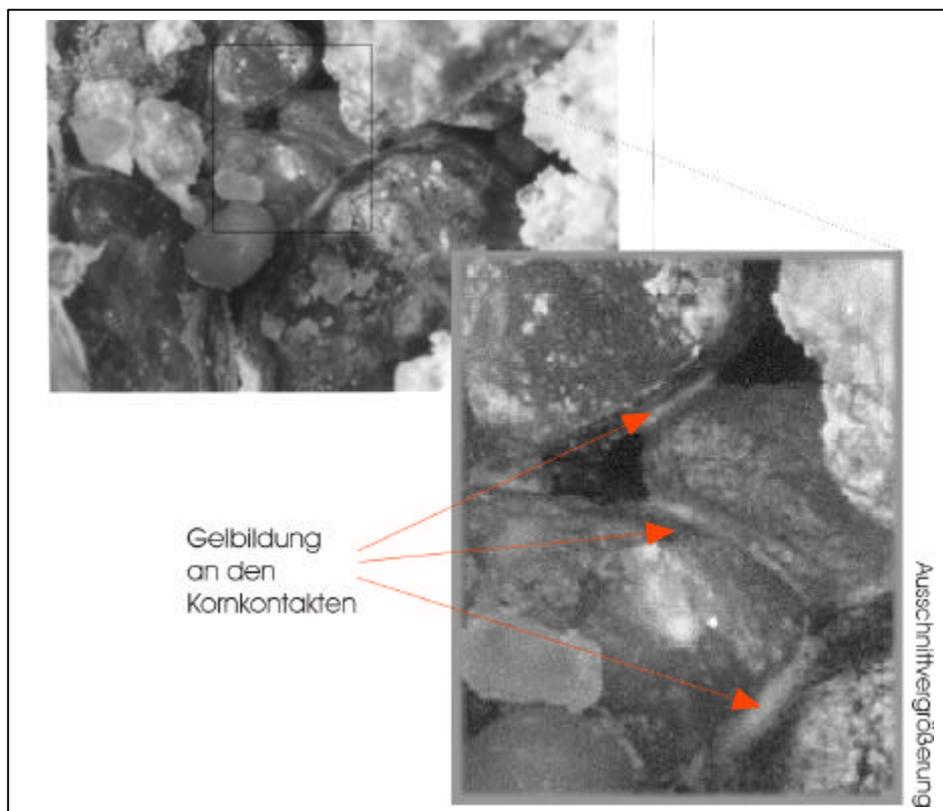


Abb. 7.34: Gelbildung an den Kornkontakten (Ausschnitt ca. 15-fach vergrößert)

In den Abb. 7.31 bis Abb. 7.34 ist das Korngefüge mit leichter Vergrößerung dargestellt. Bereits die beiden ersten Abbildungen (Abb. 7.31, Abb. 7.32) zeigen sehr deutlich, daß der Porenraum nicht vollständig mit Silikatgel gefüllt ist, sondern daß dieser zum größten Teil frei geblieben ist. Besonders in den Abb. 7.33 und Abb. 7.34 kann deutlich erkannt werden, daß das Silikatgel im wesentlichen an den Korn-Kontakten entstanden ist und auch hier die Porenräume weitgehend frei geblieben sind und somit einer zukünftigen Sickerwasserbewegung weiterhin zur Verfügung stehen.

Mit Hilfe dieser mikroskopischen Aufnahmen werden die eingangs aufgestellten theoretischen Überlegungen anschaulich bestätigt (vgl. Kapitel 6.3).

7.2 Erprobung des DRÄNSTAB-Verfahrens unter realen Bedingungen

Mit Hilfe eines Feldversuches sollte das DRÄNSTAB-Injektionsverfahren unter realen Verhältnissen in natürlichen Materialien erprobt werden. Hierzu wurde auf einem Gelände im Rheinhafen von Karlsruhe ein Versuchsstandort ausgewählt, dessen Untergrundaufbau eine suffusionsgefährdete Wechsellagerung aus Kies/Sand und reinen Leerkieslagen aufwies (vgl. Abb. 7.35). Es war geplant, ein Bodenvolumen von insgesamt 4 m^3 lückenlos zu stabilisieren.

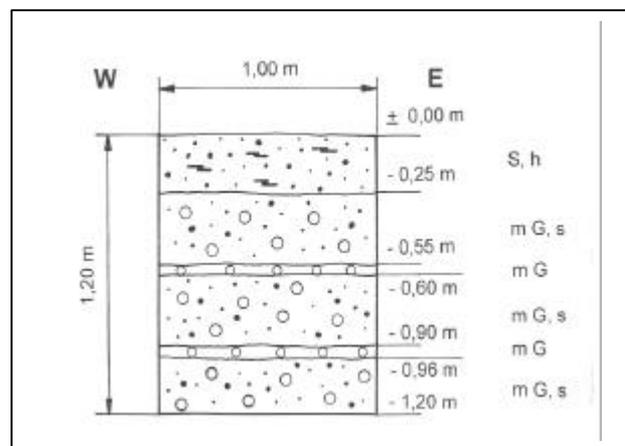


Abb. 7. 35: *Darstellung des Untergrundaufbaus im Bereich des Standortes des Feldversuches (SANNWALD, 1997; DIN 4023)*

7.2.1 Injektionstechnik und Anordnung der Einpreßstellen

Für die Eingabe des Wasserglases wurden Einpreßschläuche entsprechend der in dem Großversuch verwendeten Art eingesetzt. Die Einpreßebene wurde bei 0,60 m unter Gelände festgelegt.

Die Einpreßschläuche für das CaCl_2 besaßen ebenfalls identische Abmessungen, hatten aber über eine größere Strecke verteilt Austrittsöffnungen (28 Bohrungen à 2 mm Durchmesser, entsprechend Bauart 2* aus dem Laborversuch) und wurden zudem bis in 1 m Tiefe eingebracht. Damit sollte erreicht werden, daß das CaCl_2 über die Höhe verteilt und besser an das Wasserglas herangebracht werden konnte (vgl. Abb. 7.36). Zudem wurde diesen Schläuchen noch ein Schutzschlauch (als Manschette) übergezogen, der ein Eindringen von Wasserglas und damit ein Verstopfen der Austrittsöffnungen verhindern sollte. Der Schutzschlauch wurde unmittelbar vor

dem 2. Injektionsschritt gezogen. Die Gleitfähigkeit zwischen den Schläuchen wurde durch Talkumpuder erhöht.

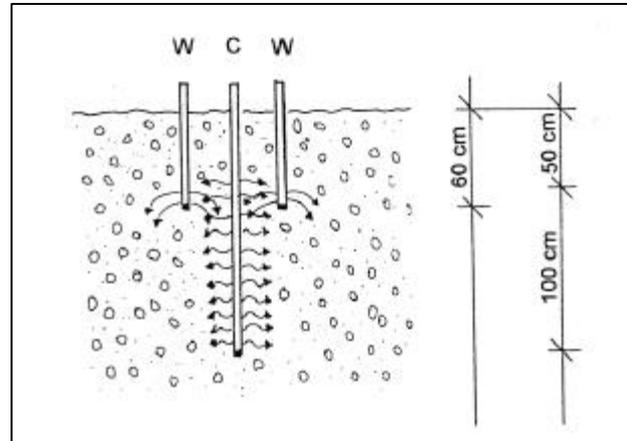


Abb. 7.36: Anordnung der Einpreßstellen beim Feldversuch für Wasserglas und CaCl_2 (Schemaskizze)

Um den vorgesehenen Bodenkörper mit möglichst wenig Einpreßstellen lückenlos zu erfassen, wurden sowohl die Einpreßstellen für das Wasserglas als auch die für das CaCl_2 jeweils in einem Dreieckraster angeordnet (Abb. 7.37). Die beiden Raster waren dabei so versetzt, daß die Ecken des einen in der Mitte der Dreiecke des anderen platziert waren.

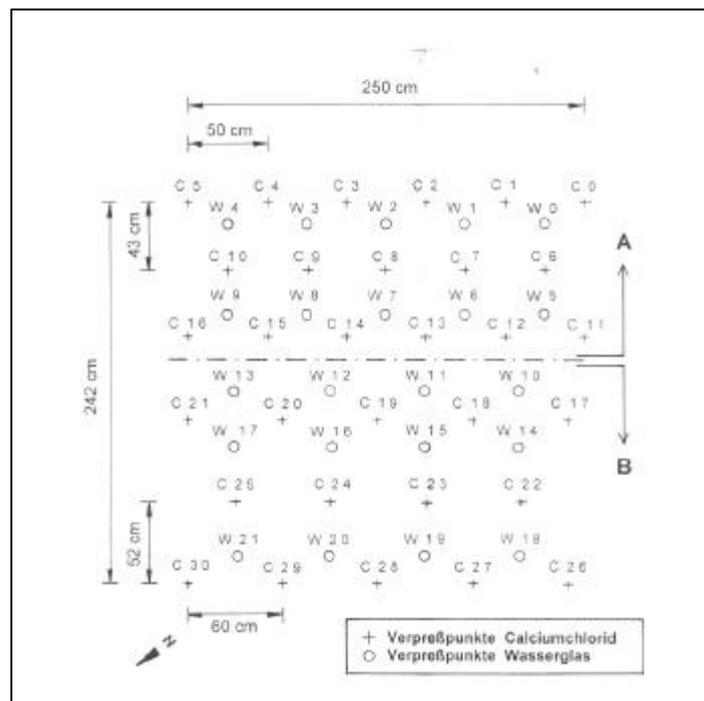


Abb. 7.37: Grundriß des Testfeldes mit Anordnung der Einpreßstellen

Das Testfeld wurde in 2 Bereiche mit unterschiedlichen Abständen der Einpreßstellen unterteilt: im Bereich A hatten die Einpreßstellen einen Abstand von 0,50 m, in Bereich B von 0,60 m. Dies sollte Aussagen über die tatsächliche laterale Ausdehnung des Injektionskörpers erlauben, da bei den Laborversuchen zumeist Einflüsse durch die seitliche Begrenzung gegeben waren.

Die Einpreßschläuche wurden mit Hilfe eines Rohres mit verlorener Spitze eingebracht, wobei mit einer Sonde bis 1,50 m unter unter GOK vorgerammt wurde. Wie sich bereits im Großversuch im Labor gezeigt hatte, bildeten sich durch das Herausziehen der Rohre Wegigkeiten um die Einpreßschläuche. Aus diesem Grund wurde bei allen übrigen Eingabestellen gründlich nachverdichtet.

Die erforderliche Wasserglasmenge wurde nach dem in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren ermittelt. An CaCl_2 -Härter wurde die etwa 1,5-fache Menge eingepreßt.

7.2.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Um den Zeitaufwand für das Verfahren zu verringern, wurden - im Gegensatz zu den Laborversuchen - beim Feldversuch sowohl bei der Wasserglas- als auch bei der CaCl_2 -Verpressung immer 4 Schläuche gleichzeitig mit dem jeweiligen Medium beaufschlagt (Abb. 7.38). Einpreßdruck und Durchfluß wurden registriert, wobei der Durchfluß immer dem Vierfachen eines einzelnen Einpreßpunktes entsprach.

Das Wasserglas wurde mit einer Einpreßrate von 0,39 l/min und einem Druck von 1 bis 1,3 bar pro Eingabestelle eingegeben. Da der Einpreßdruck mit zunehmender Versuchszeit abnahm, wurde der Durchfluß auf 0,88 l/min je Einpreßstelle erhöht, um die gesamte Einpreßzeit zu verringern. Der Druckabfall kann sowohl auf eine Aufweitung der Porenkanäle als auch auf das Erreichen der sehr viel stärker durchlässigen Leerkieslagen zurückgeführt werden. Nach Beendigung des ersten Injektionsschrittes wurden die Einpreßschläuche mittels Druckluft gereinigt. Mit dem zweiten Injektionsschritt - der CaCl_2 -Eingabe - wurde erst 24 Stunden später begonnen, um dem Wasserglas genügend Zeit zur Ausbreitung zu geben. Wie zuvor wurden zunächst ebenfalls 4 Eingabestellen gleichzeitig mit der Lösung beaufschlagt. Da die

Austrittsöffnungen allerdings über die Höhe von einem Meter verteilt waren, konnte sich kein einheitlicher Durchfluß einstellen. Es wurden deshalb nacheinander die Eingabestellen einzeln beaufschlagt. Dabei ging jedem Einpreßvorgang das Ziehen der Schutzschläuche voraus. Im Gegensatz zu den Laborversuchen stellte sich auch bei relativ hohem Durchfluß von 2,6 l/min nur ein relativ niedriger Druck von 0,05 bar ein, der auch mit zunehmender Versuchsdauer aufgrund der Verfestigungsreaktion nicht erwartungsgemäß anstieg. Dies hängt vermutlich ebenfalls mit den gut durchlässigen Leerkieslagen zusammen, über die große Mengen des Härterers druckfrei abfließen konnten. Erst bei erheblich gesteigertem Durchfluß auf ca. 10 l/min stieg der Druck auf ca. 0,5 bar an. Da die eingesetzte Pumpe dabei allerdings viel Luft ansaugte, wurden die weiteren Eingabestellen mit konstantem Durchfluß beaufschlagt.

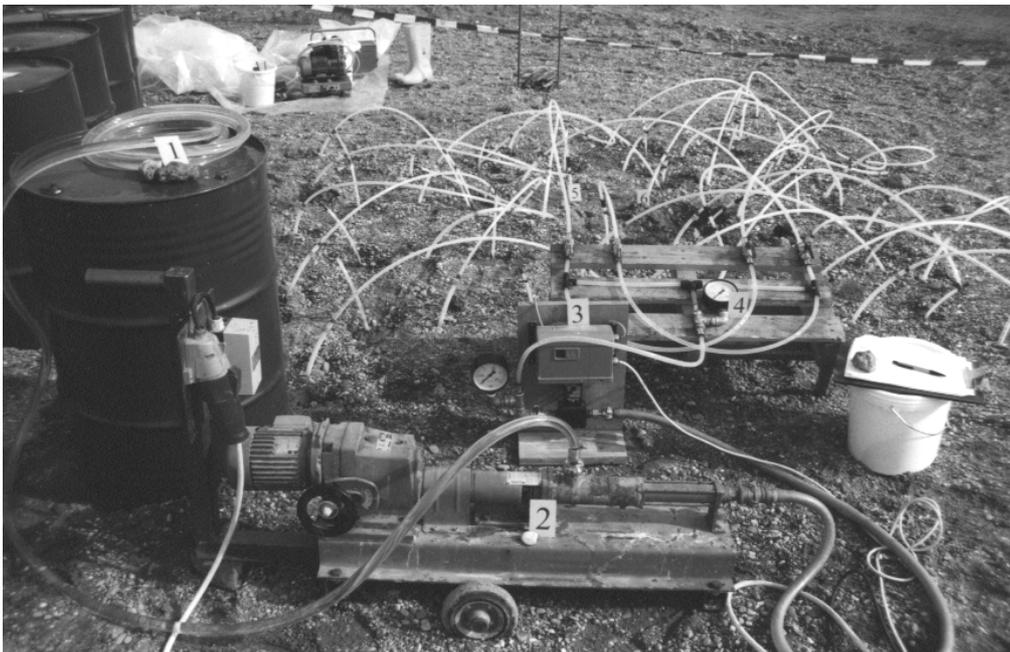


Abb. 7.38: Versuchsaufbau Feldversuch: (1) Vorratsbehälter mit Einpreßmittel; (2) Pumpe; (3) induktiver Durchflußmesser; (4) Einpreßpult; (5) Einpreßschlauch für Wasserglas; (6) Einpreßschlauch für CaCl_2

Im Gegensatz zu den Laborversuchen wurde das CaCl_2 zusätzlich noch über die Einpreßstellen für Wasserglas eingegeben. Dies sollte eine möglichst vollständige Reaktion des im Boden verbliebenen Wasserglases mit seinem Härter gewährleisten.

Das Testfeld wurde nach Versuchsende mit Hilfe eines Baggers an drei Seiten bis in ca. 1,5 m Tiefe freigelegt (Abb. 7.39, Abb. 7.40). Die nicht verfestigten Bodenbereiche wurden danach von Hand entfernt. Bis ca. 0,35 m unter GOK zeigte sich dabei keine Verfestigungswirkung; der darunterliegende Bereich war dagegen gleichmäßig über das gesamte Bodenvolumen stabilisiert.

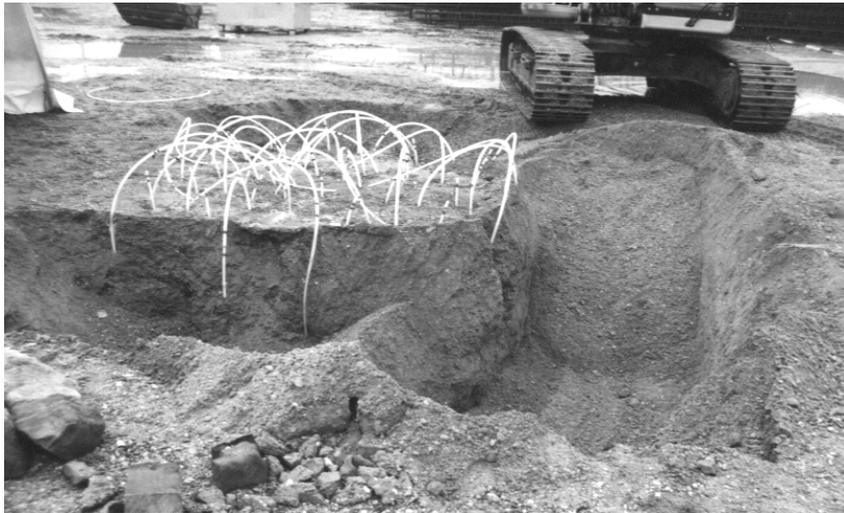


Abb. 7.39: Freilegung des verfestigten Bodenbereiches im Testfeldes



Abb. 7.40: Im Feldversuch hergestellter dränfähiger Injektionskörper

Wie in Abb. 7.40 erkenntlich, konnten sich die randlichen Stabilisierungskörper bei diesem Versuch ungehindert entfalten, und sie zeigten eine deutlich zylindrische Ausbildung der Einzelkörper. Besonders in den Leerkieslagen (vgl. Abb. 7.41) zeigte sich bei einer insgesamt sehr guten Verfestigung, daß durch das Silikatgel nur die Korn-zu-Korn-Kontakte verfestigt waren und die Porenräume weitgehend frei blieben.

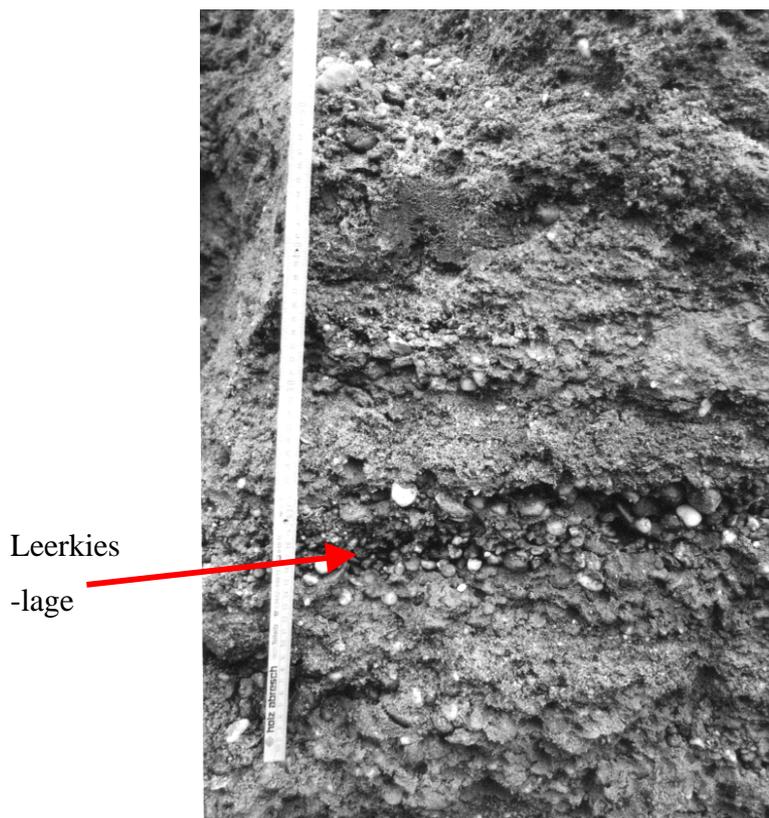


Abb. 7.41: Verfestigter Bodenbereich in geschichteten, fluviatilen Lockergesteinsablagerungen mit Leerkieslage (vgl. Abb. 7.35)

Zur Überprüfung der Durchlässigkeit des stabilisierten Bereiches wurden Sickerversuche durchgeführt (vgl. Abb. 7.42). Dazu wurden verrohrte Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 0,2 m und einer Höhe von 0,3 m hergestellt. Ein Sickerversuch wurde zum Vergleich im unverfestigten Boden neben dem Versuchsfeld durchgeführt. Nach Einpassen der Rohre wurden die unverfestigten Teile mit einem Industriesauger entfernt, der Zwischenraum zwischen Rohraußenwand und Boden mit Schnellzement verfüllt und abgedichtet.



Abb. 7.42: Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit des im Feldversuch hergestellten dränfähigen Injektionskörpers

Zur Bestimmung der Durchlässigkeit wurde jeweils eine bestimmte Menge Wasser eingegeben und das Absinken des Wasserpiegels über die Zeit registriert.

Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche zeigen, daß der stabilisierte Bodenbereich eine insgesamt noch gute Restdurchlässigkeit aufweist. Von einer Ausgangsdurchlässigkeit von durchschnittlich $k \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ im unverfestigt anstehenden Boden wurde die Durchlässigkeit infolge der Stabilisierungsbehandlung auf $k \approx 9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ verringert. Dieser Wert kann noch als durchlässig bezeichnet werden. Der behandelte Bodenkörper setzt dem Sicker- und Grundwasser somit nur einen geringen Widerstand entgegen.

8 Zusammenfassende Bewertung der durchgeführten Untersuchungen

Die in den Labor- und Feldversuchen durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß es möglich ist, nichtbindige Lockergesteine oberhalb des Grundwasserspiegels zu stabilisieren, ohne gleichzeitig vollständig abdichtend zu wirken. Allerdings haben die Versuche ergeben, daß die

Durchlässigkeit feinkörniger Erdstoffe erwartungsgemäß wesentlich stärker vermindert wird als die von grobkörnigen Materialien. Bereits bei feinsandigen Materialien ist die nach der Ausbreitungsphase verbliebene Wasserglassättigung (Feldkapazität) so hoch, daß die Durchlässigkeiten nach Bildung des Gels sehr stark herabgesetzt werden. Zudem sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der relativ viskosen Wasserglaslösung in der ungesättigten Zone bei vergleichsweise feinkörnigen Erdstoffen zu gering, als daß in vernünftigen Zeiträumen mit einer ausreichenden Benetzungsreichweite gerechnet werden kann. Ein Einsatz ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur dann möglich, wenn - wie in Abb. 6.26 beschrieben - mehrere Einpreßstellen übereinander angeordnet werden. Dadurch läßt sich die Ausbreitungsphase deutlich verkürzen. Da der Bindemittelanteil im Vergleich mit den mit herkömmlichen Verfahren stabilisierten Böden geringer ist, wird die erzielbare Restdurchlässigkeit aber auch hier tendenziell höher sein.

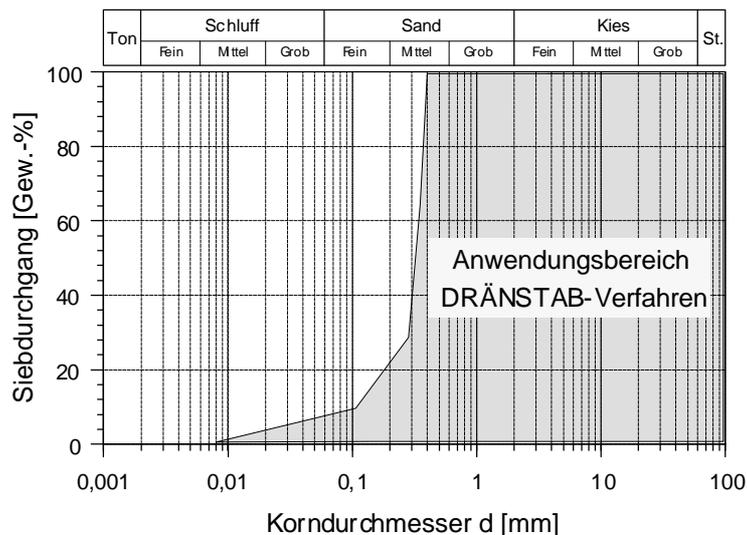


Abb. 8.1 Anwendungsbereich DRÄNSTAB-Behandlungsverfahren.

Aus den genannten Gründen wird eine Anwendung des Verfahrens nur auf die in Abb. 8.1 angegebenen Korngrößenbereiche empfohlen.

9 Beurteilung der Umweltverträglichkeit des DRÄNSTAB-Verfahrens

Wie beim Joosten-Verfahren wird bei dem vorgestellten DRÄNSTAB-Verfahren Natriumwasserglas mit einem anorganischen Härter (CaCl_2) zur Reaktion gebracht. Entgegen der

Vorgehensweise beim Joosten-Verfahren wird hierbei Wasserglas und Reaktiv nicht unmittelbar nacheinander eingepreßt, sondern es wird dem Wasserglas Zeit gelassen, sich nach unten auszubreiten. Der Härter wird erst mit einer zeitlicher Verzögerung eingepreßt.

Zudem unterscheidet sich das DRÄNSTAB-Verfahren aufgrund seiner ausschließlichen Anwendung in der ungesättigten Bodenzone entscheidend vom Joosten-Verfahren, dessen Anwendung – wie bei allen Injektionsverfahren – überwiegend im grundwassergesättigten Bereich zu sehen ist.

Diese beiden wichtigen Unterscheidungsmerkmale haben - wie sich im folgenden zeigen läßt - auch einen entscheidenden Einfluß auf das vom DRÄNSTAB-Verfahren ausgehende Gefährdungspotential für das Grundwasser.

Bei der Bewertung eines Verfahrens hinsichtlich einer möglichen Kontamination des Grundwassers muß zunächst festgestellt werden, welche Stoffe an dem Verfahren überhaupt beteiligt sind, bzw. welche Reaktionsprodukte dabei entstehen. Die bei der Anwendung des DRÄNSTAB-Injektionsverfahrens ggf. zu einer Kontamination führenden Stoffe sind die beiden Ausgangskomponenten

- ◆ Natrium-Wasserglas (Natriumsilikat) und
- ◆ Anorganisches Reaktiv: Calciumchlorid (CaCl_2)

sowie Nebenprodukte dieser Ausgangskomponenten, die infolge deren Verunreinigung mit in den Untergrund eingebracht werden. Nach DIN 4093 dürfen zwar nur Wasserglas und Härter mit einer Werksbescheinigung und definierter Qualität verwendet werden. Jedoch sind in technischem Wasserglas bereits bestimmte Kationen und Anionen (wie z. B. Schwermetalle) in z. T. nicht unerheblicher Konzentration enthalten (BRAUNS ET AL., 1996; NIX, 1997).

Neben den erwähnten Ausgangskomponenten und deren Nebenprodukten entstehen bei der Gelbildung Reaktionsprodukte, die theoretisch ebenfalls zu einer Kontamination führen können. Dies sind im Fall der DRÄNSTAB-Injektionen:

- ◆ Kochsalz (NaCl) und
- ◆ Natronlauge (NaOH) als Na^+ und OH^- -Ionen in Lösung.

Des Weiteren kann es im Untergrund durch physikalische und chemische Prozesse beispielsweise zu pH-Wert-Änderungen und damit zu einer Mobilisierung organischer und anorganischer Substanzen aus Boden und Grundwasser kommen. Mögliche organische Mobilisate sind beispielsweise die in NaOH löslichen Huminstoffe, die allerdings nur bei hohen pH-Werten mobil sind und bei Kontakt mit gepuffertem Grundwasser häufig wieder ausfallen.

Da nicht auszuschließen ist, daß die an dem Verfahren beteiligten Komponenten bzw. Reaktionsprodukte über das Sickerwasser bis in das Grundwasser verfrachtet werden können, wird für eine spätere Anwendung des Verfahrens u. U. eine behördliche Genehmigung erforderlich sein. Nach § 34 (1) des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG, 1986) wird diese Genehmigung nur dann erteilt werden können: „... wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist.“ (§2 (1) WHG).

Eine Vielzahl der seit langem für Abdichtungszwecke zum Einsatz kommenden Baugrundinjektionsmittel basieren – wie das DRÄNSTAB-Injektionsverfahren - auf der Kombination von Natriumwassergläsern und anorganischen Reaktiven. Aufgrund der Verträglichkeit der beteiligten Substanzen mit dem Boden und dem Grundwasser wurden diese Injektionsverfahren für Abdichtungszwecke in der Vergangenheit von den zuständigen Behörden in der Regel zugelassen. Für die Genehmigungen spielte dabei v. a. die Bewertung durch entsprechende Fachinstitute eine entscheidende Rolle.

So wurde beispielsweise in einem vom Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung/Karlsruhe (HIESSL & HILLENBRAND, 1992) für TAB (1993) erarbeiteten Gutachten ausgesagt: „Aufgrund der Ergebnisse der o. g. Forschungsprojekte können anorganische Silikatgele als relativ umweltverträglich eingeschätzt werden.“

Auch in einem Bericht des HYGIENE-INSTITUTS IN GELSENKIRCHEN (1994) über Injektionssysteme auf der Basis Wasserglas/Natriumaluminatlauge wird ausgesagt: „Natronlauge und Natriumsilikate sind gemäß Trinkwasserverordnung (TVO) als Zusatzstoffe in der Trinkwasseraufbereitung zugelassen, ...“.

Wie diese Berichte und Gutachten zeigen, kann die Verwendung von Wasserglas und die entstehende Natronlauge beim DRÄNSTAB-Injektionsverfahren an sich als unbedenklich eingestuft werden. Dies gilt ebenso für das im ungesättigten Bereich ausfallende Kochsalz (NaCl) sowie für das Calciumchlorid (CaCl₂).

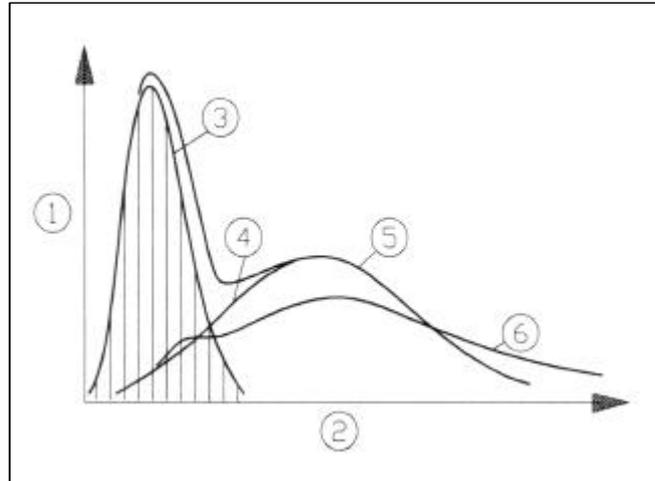


Abb. 9.1: Verlauf einer Grundwasserkontamination (nach MARTAK, 1988; aus KUTZNER, 1991)

- ① Intensität der Beeinflussung
- ② Beobachtungszeit
- ③ Beeinflussung während Injektion („Primärphase“)
- ④ Beeinflussung infolge Um- u. Durchströmung des Injektionskörpers („Sekundärphase“)
- ⑤ Summenlinie an nahegelegener Meßstelle
- ⑥ Summenlinie an entfernterer Meßstelle

Neben einer Beeinflussung durch die erwähnten Komponenten kann auch von der aus dem Injektionskörper entweichenden Synäreseflüssigkeit eine Gefährdung des Grundwassers ausgehen. Die Menge der Synäreseflüssigkeit ist unmittelbar vom Neutralisationsgrad des Hartgels abhängig. Bei der beim DRÄNSTAB-Verfahren erfolgenden Gelbildungsreaktion wird ein sehr hoher Neutralisationsgrad erreicht, so daß überhaupt nur geringe Mengen an Synäresewasser entstehen.

Im Fall der DRÄNSTAB-Injektionen ist weiterhin zu berücksichtigen, daß eine Anwendung nur im ungesättigten Bodenbereich vorgesehen ist. Eine direkte Einleitung in das Grundwasser liegt demnach nicht vor. Die von MARTAK (1988) untersuchte Grundwasserkontamination durch das Joosten-Verfahren zeigte, daß besonders in der sog. „Primärphase“ (Abb. 9.1, ③), in der das Injektionsgut beim Einpressen in den gesättigten Bereich mit dem Grundwasser in Kontakt

kommt, dieses verfrachtet wird und das Grundwasser belastet. Gerade bei einer Injektion im gesättigten Bereich sind die Belastungen des Grundwassers durch den eigentlichen Injektionsvorgang wesentlich höher als der nachfolgende Auslaugungsvorgang infolge einer Grundwasserdurchströmung.

Dies zeigt auch die Studie von BRAUNS ET AL. (1996) zur Verwendung von Weichgelen zur horizontalen Abdichtung von Baugruben in Berlin. Auch dort wird die Intensität der Grundwasserbeeinflussung entsprechend der einzelnen bautechnischen Schritte phasenweise gesehen. Die direktesten und damit stärksten Auswirkungen ergeben sich dabei in der Phase der Einpressung des Injektionsmittels, das zu diesem Zeitpunkt noch in einer kolloidischen Lösung vorliegt und sich v. a. in den Randzonen mit dem umgebenden Grundwasser vermischt.

Durch die Anwendung des DRÄNSTAB-Injektionsverfahrens in der ungesättigten Zone wird eine Verfrachtung wie in der „Primärphase“ nach MARTAK (1988, s. Abb. 9.1, ③) oder in der von BRAUNS ET AL. (1996) beschriebenen Einpreßphase nicht stattfinden, so daß eine wichtige Quelle für einen potentiellen Stoffeintrag entfällt. Auch die Belastung infolge der „Sekundärphase“ (MARTAK, 1988, s. Abb. 9.1, ④), in der das ausreagierte Injektionsgut permanent vom Wasser benetzt und umspült wird und dieses kontaminieren könnte, spielt beim DRÄNSTAB-Injektionsverfahren nur eine untergeordnete Rolle, da ja nur gelegentlich, beispielsweise bei Niederschlagsinfiltration, eine stärkere Benetzung und Durchsickerung stattfindet. Ansonsten findet in dem stabilisierten Bereich nur eine geringfügige Wasserbewegung statt.

Eine Benetzung bzw. „Durchströmung“ des stabilisierten Bodenbereiches findet lediglich durch das Sickerwasser statt. Da dieses aber in weitaus geringeren Mengen den behandelten Bodenbereich durchströmt, ist auch der Stoffaustrag wesentlich geringer. Aufgrund dieser geringen Durchströmung werden wesentlich geringere Frachtraten, allerdings über einen längeren Zeitraum verteilt, ausgebracht.

Im Vergleich zum Joosten-Verfahren steht im Augenblick der Härtereingabe für die Gelbildung insgesamt weniger Wasserglas zur Verfügung, so daß auch weniger Wasserglas pro zu behandelndem Bodenvolumen eingebracht werden muß. Auch steht dem CaCl_2 -Reaktiv ein

größerer Porenraum zur Ausbreitung zur Verfügung, so daß es den wasserglasbenetzten Bodenbereich vollständiger durchdringen kann als beim Joosten-Verfahren, wo es schwierig ist, alles Wasserglas mit dem Reaktiv zu erreichen. Aus diesem Grund wird beim Joosten-Verfahren ein Großteil des Wasserglases nicht in die Gelbildung einbezogen und steht einer Verfrachtung mit dem Grundwasser zur Verfügung. Beim DRÄNSTAB-Injektionsverfahren ist die Schichtdicke der Wasserglashüllen im Porenraum und in den Porenzwickeln wesentlich geringer, so daß die Gelbildungsreaktion vollständiger ablaufen kann.

Vor dem Hintergrund dieser vergleichenden Betrachtung kann das von dem DRÄNSTAB-Injektionsverfahren ausgehende Gefährdungspotential als relativ gering eingestuft werden. Zumindest im Vergleich zu den heute häufig eingesetzten chemischen Injektionsverfahren zur Baugrundabdichtung ist das Gefährdungspotential nicht höher einzustufen. Dies hängt zum einen wesentlich damit zusammen, daß nicht direkt in den Grundwasserbereich injiziert wird, sondern nur Erdstoffe der ungesättigten Zone behandelt werden. Zum anderen ist dies auch dadurch bedingt, daß die Gelbildungsreaktion nicht zeitlich verzögert, sondern schlagartig abläuft.

Durch eine sorgfältige Abschätzung der erforderlichen Volumina der beteiligten Stoffe sowie eine sachgemäße Ausführung kann eine Beeinflussung der Umwelt auf ein sehr geringes Maß reduziert werden.

10 Denkbare Anwendungsbereiche des DRÄNSTAB-Injektionsverfahrens

Das auf der Grundlage des Joosten-Verfahrens entwickelte DRÄNSTAB-Injektionsverfahren kann als eine spezielle Methode für ganz spezifische geotechnische Bedingungen angesehen werden. Es gewährleistet, daß die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund durch die Behandlung in weitaus geringerem Maß gestört werden als bei den üblicherweise angewandten Injektionsverfahren und somit nachteilige Auswirkungen möglichst gering gehalten werden. Die Auswirkungen auf die hydraulischen Verhältnisse können mit Hilfe numerischer Grundwassermodellierungsprogramme simuliert werden (z. B. VISUALMODFLOW FOR WINDOWS; GUIGUER & FRANZ, 1995).

Neben einer Anwendung im Bereich der eingangs vorgestellten historischen Bauwerke ist auch ein Einsatz bei unterschiedlichen Problemstellungen des Tief- und Dammbaus denkbar. Auch dort kann das DRÄNSTAB-Verfahren in bestimmten Fällen als eine mögliche Alternative zu den gängigen bautechnischen Verfahren angesehen werden. Im folgenden werden nun zwei denkbare Anwendungsbereiche vorgestellt.

10.1 Anwendungsbereich Baudenkmäler

Zur Sanierung bzw. langfristigen Sicherung der Verhältnisse beispielsweise bei den eingangs beschriebenen Fallbeispielen Neresheim und Schloß Heidecksburg sind die konventionellen bautechnischen Stabilisierungsverfahren nur bedingt geeignet. Dies liegt darin begründet, daß sie den Baugrund infolge der Behandlung nahezu vollständig abdichten bzw. sein Gefüge sehr stark stören. Auch sind z. T. sehr umfangreiche Eingriffe in die Bausubstanz erforderlich, so daß diese Verfahren insgesamt nicht als besonders schonend angesehen werden können.

Unter ganz speziellen geohydraulischen Randbedingungen liegen die Vorteile des im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellten DRÄNSTAB-Verfahren auf der Hand, da es

- nicht in die Gebäudesubstanz eingreift,
- unmittelbar dort ansetzt, wo die eigentlichen Schadensursachen liegen,
- die natürlichen geohydraulischen Verhältnisse im Bereich des Bauwerkes möglichst wenig verändert und damit
- die Auswirkungen - z. B. auf andere Gebäudeteile - gering hält.

Für eine zielgerichtete Behandlung müssen die relevanten Bodenbereiche hinsichtlich Tiefenlage, Mächtigkeit und Ausdehnung genau lokalisiert und die entsprechenden Parameter bestimmt werden (DIN 4093). Dies kann im Fall Neresheim nur mit Hilfe eines umfangreichen Erkundungs- und Untersuchungsprogramms geschehen. Bei der Festlegung der zu behandelnden Bereiche sind aber auch die hydraulischen Verhältnisse zu berücksichtigen. In Neresheim sind diese gekennzeichnet durch eine im Dolinenbereich vertikal nach unten gerichtete Entwässerung, wobei die Sickergeschwindigkeiten im Inneren der Doline am höchsten sind. Da die relevanten,

erosionsanfälligen Bereiche in unterschiedlichen Tiefen innerhalb der Dolinenfüllung vorliegen, wird vermutlich eine tiefenmäßig gestaffelte Behandlung erforderlich.

Die Verhältnisse im Fall des Schlosses Heidecksburg sind vergleichbar mit denen in Neresheim. Die Entwässerung erfolgt auch an diesem Standort über die zu Spalten erweiterten Klüfte vertikal nach unten. Da aufgrund der durch die Bergakademie in Freiberg durchgeführten Erkundungsmaßnahmen die Lage der Klüfte genau bekannt ist, können die Verfestigungsmaßnahmen gezielt angesetzt werden.

Durch die Behandlung des Lockermaterials unmittelbar über den Klüften kommt es hierbei zu einer dauerhaften Stabilisierung der Deckschichten, wodurch ein weiterer Materialaustrag unterbunden wird (Abb. 10.1). Die behandelten Bodenbereiche wirken dabei zum einen stabilisierend auf den behandelten Bodenbereich; da aber die Deckschichten nicht in ihrer Gesamtheit stabilisiert werden, wirken sie zum anderen auch wie eine „Brücke“ über den Spalten, die das überlagernde Material „trägt“.

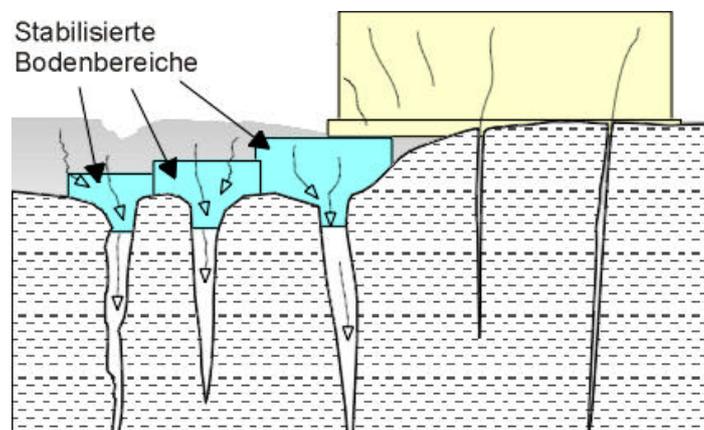


Abb. 10.1: Möglichkeit der Stabilisierung der Lockergesteinsdeckschichten über den Klüften im Bereich der Heidecksburg (schematisch)

Ein weiterer Materialaustrag ist dann nicht mehr möglich, da die behandelten Bereiche wie „Filter“ wirken und nur das anfallende Sickerwasser passieren lassen, den Boden aber zurückhalten.

10.2 Anwendungsbereich Dammbau

Neben den beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten im Bereich eines überdeckten Karstes kann ein weiterer Anwendungsbereich beispielsweise in der Sanierung bzw. Stabilisierung von gefährdeten Zonen in oder unter Erddämmen und Hochwasserschutzdeichen gesehen werden.

Sowohl die innerhalb des Dammkörpers zwischen den einzelnen Bauteilen auftretenden Erosions- und Suffosionsprobleme, vor allem aber auch die ggf. in seinem Untergrund ablaufenden hydromechanischen Bodendeformationen, können bekanntlich zu einer erheblichen Gefährdung der Standsicherheit des Bauwerkes führen. Die Ursache für die Zerstörung von Dämmen ist häufig der Erosionsgrundbruch. Dabei wird die Zerstörung durch den im Untergrund stattfindenden hydraulischen Transport von Bodenmaterial und die damit verbundene Hohlrumbildung herbeigeführt. Bei Flußdeichen, die auf bindigen, von Sanden unterlagerten Deckschichten gegründet sind, kommt es im Hochwasserfall häufig zur Ausbildung von Quelltrichtern und Erosionskanälen unterhalb des Dammkörpers. Bei Hochwasser entwickelt sich im Grundwasserleiter ein artesischer Druck, infolge dessen im Bereich des luftseitigen Dammfußes Quellen auftreten, die Sand fördern. Von diesem Quelltrichter ausgehend entwickelt sich ein Erosionskanal, der in Richtung des Oberwassers wandert. Dieses Phänomen wird als rückschreitende Erosion bezeichnet, da die Entwicklungsrichtung des Erosionsprozesses der Strömung entgegengerichtet ist (MIESEL, 1978; HANSES et al., 1985).

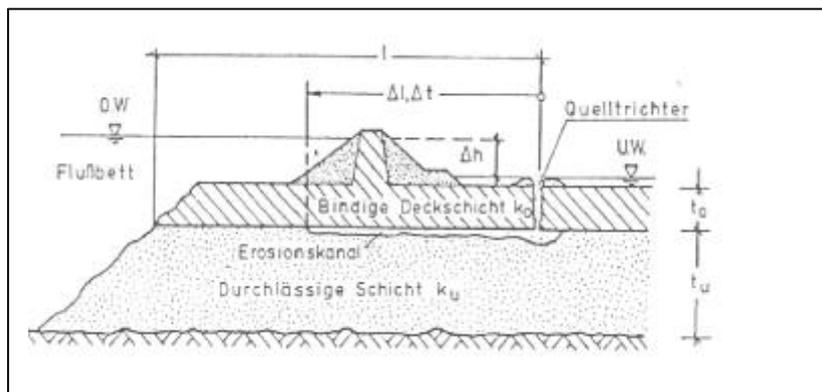


Abb. 10.2: Beispiel für rückschreitende Erosion unter einem Hochwasserdamm mit Quelltrichterbildung auf der Luftseite und Kanalentwicklung unterhalb einer bindigen Deckschicht (MIESEL, 1978)

Ausgelöst werden diese Prozesse bei Überschreitung kritischer hydraulischer Gradienten an der Kontaktfläche zwischen den überlagernden bindigen Deckschichten und den darunter liegenden sandig-kiesigen Erdstoffen.

Wie in Abb. 10.3 dargestellt, wäre auch in diesem Fall als Alternative eine Stabilisierung der erosions- und suffosionsgefährdeten Bodenbereiche mit Hilfe des DRÄNSTAB-Verfahrens denkbar. Eine Unterströmung findet im Hochwasserfall zwar weiterhin statt, allerdings ohne daß Material mobilisiert werden kann. Zum einen sind die Kornkontakte der behandelten Bodenschichten nachträglich verkittet, zum anderen wird die Strömungsgeschwindigkeit herabgesetzt, so daß die auf die Bodenteilchen wirkende Strömungskraft ebenfalls verringert wird. Im Normalwasserfall kann dann das landseitige Grundwasser dem Vorfluter – wenn auch weiterhin verlangsamt – zuströmen.

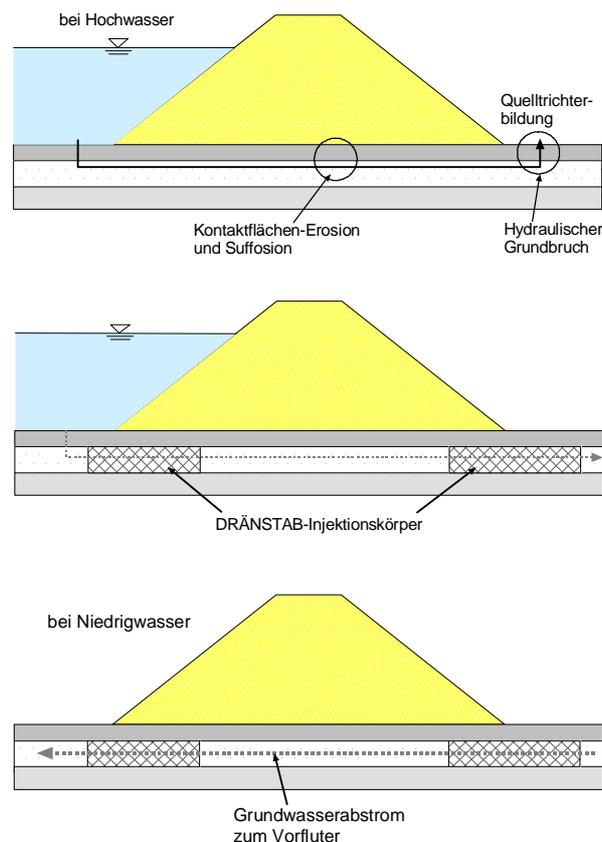


Abb. 10.3: Beispiel für die Stabilisierung des geschichteten Dammuntergrundes zur Vermeidung von Kontaktflächenerosion/-suffosion.

Als eine Möglichkeit einer Sanierung kommen in solchen Fällen zumeist abdichtende Maßnahmen zum Einsatz (Schmalwände, Spundwände, etc.), die eine Unterströmung der Deiche entweder gänzlich unterbinden bzw. zumindest den Fließweg des Wassers soweit verlängern sollen, daß die hydraulischen Gradienten verringert werden. Abdichtende Maßnahmen haben allerdings den entscheidenden Nachteil, daß sie im Normalwasserfall den landseitigen Grundwasserzstrom zum Vorfluter ebenfalls verhindern und so eine einschneidende Veränderung der lokalen hydrogeologischen Verhältnisse bedingen. Da das Phänomen der rückschreitenden Erosion vom luftseitigen Böschungsfuß ausgeht, wäre u. U. auch eine Stabilisierung dieses Untergrundbereiches ausreichend.

Für entsprechend gefährdete Dammabschnitte kann das DRÄNSTAB-Injektionsverfahren als ein sehr gut geeignetes Stabilisierungsverfahren angesehen werden, da:

- der Dammuntergrund dauerhaft stabilisiert wird
- die hydraulischen Verhältnisse nicht grundlegend verändert werden (landseitiger Grund- und Sickerwasserabstrom zum Vorfluter hin ist weiterhin möglich)
- die Schichten eine sehr gute Durchlässigkeit aufweisen, so daß das Verfahren optimal eingesetzt werden kann,
- die relevanten Schichten sehr einheitlich aufgebaut sind und über größere Strecken aushalten, so daß eine genaue Erkundung möglich ist und deshalb die eingesetzten Stoffe optimal dosiert werden können,
- die Behandlung in geringer Tiefe ausgeführt werden kann.

Aber auch Drainageeinrichtungen von Dämmen wie z. B. ein Filterfuß, Sohlfilter, Böschungsfiler, Filterteppich oder Sickerschichten, etc. können mit Hilfe des DRÄNSTAB-Injektionsverfahrens stabilisiert werden, ohne deren Dränfunktion zu unterbinden.

11 Ausblick

Wie die vorgestellten Untersuchungen gezeigt haben, ist es unter gewissen Umständen möglich, mit Hilfe des vorgestellten DRÄNSTAB-Verfahrens erosions- und suffosionsanfällige Bodenbereiche zu stabilisieren, ohne deren Durchlässigkeit dabei weitgehend zu verringern.

Es ist gelungen, mit Hilfe der hier vorgestellten theoretischen Überlegungen und praktischen Versuchen die Grundlage für eine Bemessung und Leistungsbewertung zu schaffen. Allerdings soll hier nochmals betont werden, daß das vorgestellte DRÄNSTAB-Verfahren im wesentlichen für ganz spezifische Problemstellungen, d. h. insbesondere beim Vorhandensein ganz spezieller geologischer und hydrogeologischer Randbedingungen sinnvoll eingesetzt werden kann. Nur unter diesen Bedingungen kann es als eine Alternative zu den bisher gebräuchlichen Stabilisierungsverfahren angesehen werden. Aus diesen Gründen ist beispielsweise ein Einsatz nur in der ungesättigten Zone möglich, da es im gesättigten Bereich zu einer sofortigen Verdünnung der eingepreßten Wasserglaslösung und keiner Absickerung kommt. Allerdings könnte man sich vorstellen, durch eine temporäre Grundwasserabsenkung einen ungesättigten Bereich herzustellen, in dem die Behandlung durchgeführt werden kann. Nach Reaktionsende kann dann die Absenkung wieder aufgehoben und der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden. Da sich mit einer solchen Vorgehensweise der Einsatzbereich des DRÄNSTAB-verfahrens enorm vergrößern würde, wären hierzu entsprechende (Feld-)Untersuchungen erforderlich.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Anwendung bei grobkörnigen Lockergesteinen durchaus eine Alternative zu gängigen Stabilisierungsverfahren darstellen kann; bei feinkörnigeren Erdstoffen wird das Verfahren allerdings - aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Absickerungsgeschwindigkeiten - nicht mehr wirtschaftlich einzusetzen sein, besonders wenn ausschließlich über eine einzelne Einpreßstelle verpreßt wird. Wie bereits angedeutet, bietet sich in solchen Fällen eine über die Höhe gestaffelte Wasserglaseingabe an, bei der geringere Volumina über die Höhe verteilt eingegeben werden. Auch hierzu könnten entsprechende Versuche – besonders hinsichtlich der erforderlichen Einpreßtechnik – den Einsatzbereich des Verfahrens vergrößern.

Weiterhin ist auch der Einfluß einer Schichtung innerhalb von Lockergesteinsablagerungen auf das Absickern der Wasserglas- und Härterlösung von praktischem Interesse. Wie bereits der Großversuch im Labor bzw. der abschließende Feldversuch gezeigt haben, kann beispielsweise eine grobkörnige Zwischenlage das Behandlungsergebnis durchaus günstig beeinflussen, indem diese Lage zu einer gleichmäßigeren lateralen Verteilung des Einpreßmittels beiträgt. Bei Vorhandensein undurchlässigerer Zwischenlagen kann es allerdings durch verzögertes Absickern

bzw. Aufstau des Einpreßmittels auch zu negativen Auswirkungen auf das Behandlungsergebnis kommen. In solchen Fällen sind die entsprechend unterschiedlich durchlässigen Schichten möglicherweise separat zu behandeln, etwa vergleichbar mit der oben erwähnten höhengestaffelten Methode. Auch hierzu könnten in entsprechenden Versuchen in Labor und Feld weitere, wertvolle Erfahrungen für eine zukünftige praktische Anwendung des Verfahrens gesammelt werden.

12 Literaturverzeichnis

- BAUMANN, H.: Leime und Kontaktkleber, 1967.
- BENNER, L. H.: Geländemethoden zur Wasserdurchlässigkeitsbestimmung von Lockergesteinen unter besonderer Berücksichtigung von Bergmaterial. – DMT Publik, Bochum 1991.
- BEYER, W.: Zur Analyse der Grundwasserfließbewegung. - Wiss. Zeitschr. d. TU Dresden, 16, H. 4, Dresden 1967.
- BRAUNS, J.; KAST, K.; HÖTZL, H.; EISWIRTH, M.: Anwendung von Weichgelen zur horizontalen Abdichtung von Baugruben durch Injektionssohlen - Fragen zur Beeinflussung der Grundwasserqualität. - Universität Karlsruhe: Mitteilungen Abt. f. Erddamm- und Deponiebau, H. 6. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik.; Karlsruhe 1996.
- BUSCH, K.-F., LUCKNER, L., TIEMER, K.: Geohydraulik. – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 3, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart 1993.
- BURENKOVA, V. V.: Assessment of suffosion in non-cohesive and graded soils. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. - Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), Balkeema, Rotterdam 1993.
- DAVIS, L. A., & NEUMANN, S. P.: Documentation an User's Guide: UNSAT2 Variably Saturated Flow Model. - U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-33907 1983.
- DIN 4093: Baugrund - Einpressen in den Untergrund; Planung, Ausführung, Prüfung. - Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin 1987.
- DIN 4023: Baugrund- und Wasserbohrungen; Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse. - Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin 1984.

- DIN 18130: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche. - Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin 1998.
- DONEL, M.: Bodeninjektionstechnik. - Studienunterlagen für das Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität-Gesamthochschule-Essen. Univ. Essen, Fachbereich 10 Bauwesen, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik; Verlag Glückauf, Essen 1990.
- FISCHER, T., KAST, K. & VOGEL, H.: Die Klosterkirche Neresheim – historisches Bauwerk auf schwierigem Untergrund. – Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N. F. 73; Stuttgart 1991.
- GLA, GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG: Gutachten über den Baugrund der Klosterkirche Neresheim (Nr. V/2-1454/66). – 8 S.; (unveröff.), Freiburg 1967.
- GLA, GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG : 1. Ergänzung zu Gutachten Nr. V/2-1454/66. – 3 S.; [1968a] (unveröff.), Stuttgart 1968.
- GLA, GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG: 2. Ergänzung zu Gutachten Nr. V/2-1454/66. – 2 S., [1968b] (unveröff.), Stuttgart 1968.
- GUIGUER, N. & FRANZ, TH.: Visual Modflow Version 1.50. – Waterloo Hydrogeologic Software, Waterloo 1995.
- GWINNER, M. P., HÜTTNER, R., REIFF, W. & SCHLOZ, W.: Geologische Karte 1:25 000 Baden-Württ., Blatt 7227 Neresheim-West mit Erläuterungen. – 136 S., Stuttgart 1987.
- HANSES, U.; MÜLLER-KIRCHENBAUER, H.; SAVIDIS, S. A.: Zur Mechanik der rückschreitenden Erosion unter Dämmen und Deichen. - Bautechnik 62. Jg; Berlin, 1985.
- HEISE, G. & SCHLEUBNER, H. P.: Ingenieurgeologische Untersuchungen zur schonenden erkundung von baugrundbedingten Schäden an historischen Bauwerken. – Geotechnik in der Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin 1993.
- HEISE, G., SCHLEUBNER, H. P., TONDERA, D.: Geologische Prozesse, die zu Schäden im Gründungsbereich von Burgen führen – Heidecksburg in Rudolstadt, Runneburg in Weißensee, Schloß Nossen. – Burgen und Schlösser, Zeitschrift der Deutschen Burgenvereinigung e. V. für Burgenkunde und Denkmalpflege, 94/III, 1994.
- HISSL, H. & HILLENBRAND, T.: Grundwassergefährdungspotential von Baustoffen. – Beitrag zur TA-Studie „Grundwasserschutz und Wasserversorgung“ Untersuchungsbereich „Bauindustrie und Baugewerbe“, 250 S.; Karlsruhe 1992.
- HOLLEMANN & WIBERG: Lehrbuch der Anorganischen Chemie: Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1985.

- HYDRUS 2D: Software Package for Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media – Version 1.0, U.S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Riverside, California 1996.
- IBF, INSTITUT FÜR BODEN- UND FELSMCHANIK, Universität Karlsruhe: Gutachten über Baugrund und Gründung des Mittelflügels (Konventgebäude) der Klosteranlage Neresheim. – 9 S., (unveröff), Karlsruhe 1987.
- JÄHDE, H.: Injektionen zur Verbesserung von Baugrund und Bauwerk. - VEB Verlag Technik, Berlin 1953.
- JOOSTEN, H. J.: Reichspatent Nr. 441622, München 1927.
- JOOSTEN, H. J.: Das Joosten-Verfahren zur chemischen Bodenverfestigung und Abdichtung in seiner Entwicklung und Anwendung von 1925 bis heute.. - Im Selbstverlag, Haarlem-Holland 1953.
- KUTZNER, C.: Injektionen im Baugrund. – Enke Verlag, Stuttgart 1991.
- LANGE, W.: Über physikalische Eigenschaften chemisch verfestigter Sande. – Neue Bergbautechnik 7. Jg. Heft 7, Juli 1977.
- MAAG, E.: Über die Verfestigung und Dichtung des Baugrunde. - Erdbaukurs der E.T.H. Zürich 1938.
- MARTAK, L.: Erfahrungen mit Injektionsverfahren beim U-Bahn-Bau in Wien. – Geotechnik 11/1988, S 198-209, 1988.
- MATTHEB, G.: Die Beschaffenheit des Grundwassers. - Lehrbuch der Hydrologie; Bd. 2, 2. Aufl., Gebr. Borntraeger, Berlin 1990.
- MIESEL, D.: Rückschreitende Erosion unter bindiger Deckschicht. - Vortrag Baugrundtagung, Berlin 1978.
- MOLEK, H., TOLMATSHEV, V. V., CHEMENKO, V. P.: Untersuchungen zum Mechanismus von Karstsuffosions-Erdfallbildungen und deren Einfluß auf Baumaßnahmen. – 11. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Würzburg 1997.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H.: Zur Theorie der Injektionen. - Veröff. d. Inst. f. Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 32, Karlsruhe 1968.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H. & SAVIDIS, S. A.: Grundwasserbeeinflussung durch Silikatgelinjektionen. - Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, 11, Berlin 1982.

- NEUMANN, S. P.: Saturated-unsaturated seepage by finite elements. – American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Divisions 99 (12), S. 2233-2250, 1973.
- NIX, T.: Kontaminationswirkungen auf der Abstromseite einer aus Silikatgel hergestellten Dichtwand. - Diplomarbeit (unveröff.) TU Darmstadt 1996.
- PETZOLD, A.: Physikalische Chemie der Silikate. – Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1. Aufl., Leipzig 1991.
- PIEPER, K.: Sicherung historischer Bauten. – 337 S., Berlin 1983.
- PREISS, W.: Übersicht über den konstruktiven Bauzustand der Stützmauern von Schloß Heidecksburg. – (unveröff.), Dresden 1976.
- REUTER, F., MOLEK, H.: Ingenieurgeologisch-strukturgeologische Grundlagen zur Beschreibung von Objekten des Sulfat- und Chloridkarstes. - in: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie [Hrsg.], Freiburger Forschungshefte A 622, Leipzig 1980.
- SANNWALD, M.: Vorbereitung und Durchführung eines Feldversuches zur Dränfähigen Stabilisierungsinjektion. – Vertieferarbeit, (unveröff.), Universität Karlsruhe, Inst. f. Bodenmechanik u. Felsmechanik, Abt. Erddammbau u. Deponiebau, Karlsruhe 1997.
- SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL: Lehrbuch der Bodenkunde. Enke-Verlag. Stuttgart 1998.
- SCHNEIDER, A.: Geophysikalische Baugrunduntersuchungen an der Klosterkirche Neresheim. – 12 S., (unveröff.), Bern 1973.
- SCHULER, U.: How to deal with the Problem of suffosion. – Veröff. d. Inst. f. Bodenmechanik u. Felsmechanik, Abt. Erddammbau u. Deponiebau der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1995.
- SCHULZE, B.: Injektionssohlen, theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. – Veröff. d. Inst. f. Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1992.
- SHROFF, A. V. & SHAH, D. L.: Grouting Technology in Tunneling and Dam Construction. – A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield 1993.
- SIMUNEK, J., SEJNA, M., VAN GENUCHTEN, M.Th.: HYDRUS-2D – Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media. – U.S. Salinity Laboratory, USDA/ARS, Riverside, California 1996.
- TAB, BÜRO FÜR TECHNOLOGIEFOLGEN-ABSCHÄTZUNG BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG: Jörissen, J., Socher, M., Meyer, R.: TA-Projekt „Grundwasserschutz und Wasserversorgung“. - Teilbericht „Vorsorgestrategien zum Grundwasserschutz für den Bausektor“. - TAB-Arbeitsbericht Nr. 17 – Teilbericht II, Bonn 1993.

TRINKWASSERVERORDNUNG (TVO): Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittel (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1986, Teil I.

THAUER, G.: Geotechnische Analyse von Bauschäden am Beispiel der Heidecksburg/Rudolstadt, Studienarbeit, (unveröff.), Freiberg 1992.

VAN BAERLE & CO.: Flüssige Natronwassergläser – Kennzahlen, Gernsheim 1992

VOGEL, H. & KAST, K.: Inner erosion phenomena in covered Karst region as risk to historic buildings. – XIII. ICSMFE, New Delhi, India 1994.

WHG - GESETZ ZUR ORDNUNG DES WASSERHAUSHALTS (Wasserhaushaltsgesetz – WHG), Bundesgesetzblatt Teil I, S. 1530, 1986.

ZIEMS: Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. – Dissertation, Technische Universität Dresden 1968.