

PRÜFAMT FÜR GRUNDBAU  
BODENMECHANIK UND FELSMCHANIK  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Baumbachstraße 7  
D-81245 München  
Telefon 089 / 8895-1  
Telefax 089 / 8 34 92 91  
Telex 522 854 tumue d

Im Auftrag des Bayerischen Staatsministerium  
für Landesentwicklung und Umweltfragen

## **ABSCHLUSSBERICHT**

zum Forschungsvorhaben E 12

### **Optimierung des Auflagermaterials von Dränrohren in Deponie-Basisabdichtungssystemen**

von

Dipl.-Ing. Roland Stiegeler

Der Leiter des Prüfamts:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss  
Ordinarius

März 1996

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben E12  
**Optimierung des Auflagermaterials von Dränrohren  
in Deponie-Basisabdichtungssystemen**

**Inhaltsverzeichnis**

1 Problemstellung .....	2
2 Anforderungen an das Rohraufleger und Ziel des Forschungsvorhabens .....	3
3 Angaben aus der Literatur .....	4
3.1 Allgemeines .....	4
3.2 Durchlässigkeit .....	4
3.3 Festigkeit und Steifigkeit .....	5
4 Vorliegende Erfahrungen .....	7
4.1 Veröffentlichungen zum Thema Rohrauflegermaterial .....	7
4.2 Erfahrungen im Rahmen von Bauvorhaben .....	7
4.3 Steifigkeitseigenschaften von Dränkies .....	8
5 Ausgangsmaterialien und untersuchte Mischungszusammensetzungen .....	10
5.1 Allgemeines .....	10
5.2 Grundmaterial Sand .....	10
5.3 Porenfüller (Steinmehl, Tonmehl) .....	11
5.4 Bindemittel .....	13
5.5 Mischungszusammensetzungen .....	13
6 Untersuchungsmethode .....	15
7 Untersuchungen .....	15
7.1 Herstellung und Verarbeitbarkeit der Materialmischung .....	15
7.2 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper .....	16
7.3 Einaxialer Druckversuch in Anlehnung an DIN 18136 .....	16
7.4 Triaxialversuch nach DIN 18137 Teil 2 .....	17
7.5 Bestimmung der Durchlässigkeit nach DIN 18130 .....	17
7.6 Kompressionsversuch in Anlehnung an DIN 18135 (Entwurf) .....	18
7.7 Trocken-Naß-Wechselversuch .....	18
7.8 Wasserlagerung .....	18
7.9 Erosionsversuch .....	19
8 Untersuchungsergebnisse .....	19
8.1 Allgemeines .....	19
8.2 Mischung M1 .....	20

8.3 Mischung M2 .....	20
8.4 Mischung M3 .....	21
8.5 Mischungen M4 und M5 .....	22
8.6 Mischung M6 .....	23
8.7 Mischung M7 .....	29
8.8 Mischung M8 .....	31
8.9 Mischung M9 .....	32
9 Vergleichende Darstellung der Untersuchungsergebnisse und Schlussfolgerungen .....	37
9.1 Allgemeines .....	37
9.2 Einbauwassergehalt .....	37
9.3 Porenfüller (Steinmehl, Tonmehl) .....	40
9.4 Bindemittel .....	40
10 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse .....	41
11 Hinweise für die Bauüberwachung und Bauausführung .....	44

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Für die Entwässerung von Abfalldeponien werden heute im Bereich der Deponiebasis überwiegend flexible Dränrohre aus Kunststoff, bevorzugt PE-HD, verlegt. Da erdüberdeckte flexible Rohrleitungen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit in weitem Maße auf die Stützung der rohrumgebenden Bodenmaterialien angewiesen sind, kommt den mechanischen Eigenschaften dieser Materialien besondere Bedeutung zu. Wie rechnerische Untersuchungen [11], [23] und großmaßstäbliche Versuche [20] gezeigt haben, ist die Beanspruchung bzw. die Verformung der Dränrohre in starkem Maße von der Steifigkeit des Rohrauflagermaterials und die Tragfähigkeit des Gesamtsystems Rohr-Boden von der Festigkeit des Rohrauflagermaterials abhängig. Für die Rohrleitung günstige Beanspruchungen ergeben sich, wenn der Rohrauflagerbereich und die seitliche Rohrbettung etwa vergleichbare Steifigkeiten aufweisen.

Nach DIN 19667 [4] sind im Bereich von in der Deponiebasis verlegten flexiblen Dränrohren Kiesmaterial der Körnung 16/32 mm als Dränmaterial und als Rohrauflagermaterial schwach durchlässiges standfestes Material (z.B. Sand der Korngruppe 0/2a nach DIN 4226 Teil 1 [3]) einzubauen. Das vorgeschlagene Rohrauflagermaterial weist im Vergleich zum Abdichtungsmaterial in der Deponiebasis eine um Größenordnungen höhere Durchlässigkeit auf. Dies bedingt, daß im Laufe der Zeit unterhalb des Rohres und damit gleichzeitig im Tiefpunkt des Entwässerungssystems ein Sickerwassereinstau und somit eine höhere hydraulische Beanspruchung des Dichtungsmaterials entsteht. Aus diesem Grund wurde in der Vergangenheit versucht, die Durchlässigkeit des Rohrauflagermaterials aus Sand durch die Zugabe von Bentonit zu minimieren, wodurch sich allerdings auch die Steifigkeit und die Festigkeit der Auflagermischung verringern.

Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren bei Bauvorhaben, für die als Rohrauflagermaterial ungebundene Sand-Bentonit-Mischungen verwendet wurden, jeweils einige Zeit nach dem Abschluß der Baumaßnahme wiederholt Aufweichungen des Rohrauflagermaterials festgestellt, was im Hinblick auf die Rohrverformungen, die Rohrbeanspruchungen und die Tragfähigkeit des Rohr-Boden-Systems als ungünstig zu beurteilen ist. Zu geringe Steifigkeiten und standsicherheitsgefährdende Aufweichungen des Rohrauflagermaterials lassen sich durch die Zugabe von Bindemittel verbessern bzw. vermeiden. Dies hat allerdings in der Regel wiederum Einbußen bei der Dichtigkeit des Rohrauflagermaterials zur Folge. Gleichzeitig ist darauf zu achten, daß eine zu große Steifigkeit des

Rohrauflegers unerwünschte Lastkonzentrationen im Rohrbereich bewirken würde und deshalb vermieden werden muß.

Unter Beachtung der vorgenannten Punkte stellt die Entwicklung einer mit Bindemittel verfestigten Mischungszusammensetzung für das Rohraufleger demnach ein Optimierungsproblem dar.

## **2 ANFORDERUNGEN AN DAS ROHRAUFLAGER UND ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS**

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 1 geschilderten Problematik und im Hinblick auf die baupraktische Ausführung können für Rohrauflegermischungen die folgenden allgemeinen Anforderungen formuliert werden:

- 1) Die Mischung muß mit Wassergehalten eingebaut werden können, bei der das Material gut verarbeitbar ist.
- 2) Das Rohrauflegermaterial soll leicht handhabbar und einbaubar sein sowie in seinen mechanischen Eigenschaften gegenüber geringen Wassergehaltsschwankungen beim Einbau wenig empfindlich reagieren.
- 3) Die Durchlässigkeit der abgebundenen Mischung sollte  $k < 1 \cdot 10^{-9}$  m/s betragen.
- 4) Die abgebundene Mischung sollte eine mit dem rohrumgebenden Dränkies vergleichbare Steifigkeit (ca.  $50 < E_s < 110$  MN/m<sup>2</sup> in einem Spannungsbereich von ca.  $100 < \sigma < 800$  kN/m<sup>2</sup> vgl. hierzu Abschnitt 4.3) und eine möglichst hohe Festigkeit aufweisen.
- 5) Die abgebundene Mischung darf insbesondere ihre mechanischen Eigenschaften durch äußere Einflüsse, wie z.B. Wasserzutritt oder Austrocknung nicht verändern.
- 6) Die abgebundene Mischung muß eine ausreichende Erosionsbeständigkeit aufweisen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, mittels geeigneter Laborversuche ein Rohrauflegermaterial zu entwickeln, das den vorgenannten Anforderungen gerecht wird und auch unter Baustellenbedingungen handhabbar ist.

### 3 ANGABEN AUS DER LITERATUR

#### 3.1 Allgemeines

In bezug auf die angestrebten Eigenschaften des Rohrauflagermaterials sind aufbauend auf bereits vorliegenden Erkenntnissen [5] und zur Reduzierung des versuchstechnischen Aufwandes, der Festlegung des Untersuchungsprogramms Überlegungen hinsichtlich Durchlässigkeit, Steifigkeit und Festigkeit von gebundenen Mischungszusammensetzungen aus Sand, Ton und Bentonit vorausgegangen. Hierbei wurde insbesondere versucht, anhand von Angaben aus der Literatur Hinweise zu dem Verhalten entsprechender Mischungen im Hinblick auf die vorgenannten Eigenschaften zu erhalten.

#### 3.2 Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit von gemischtkörnigen mineralischen Dichtungsschichten ist in erster Linie abhängig von ihrer Korngrößenverteilung und von ihrer Bodenstruktur (insbesondere Verdichtungszustand / Verdichtungsgrad  $D_p$  und Porenzahl  $e$ ). Darüber hinaus ist im Hinblick auf möglichst kleine Durchlässigkeiten zusätzlich die Mineralart des Feinkornanteils mitbestimmend [18], [19].

Dichteste Gefüge werden bei überwiegend grobkörnigen Böden mit Korngrößenverteilungen nach der Fullerparabel erreicht. Bei den feinkörnigen Böden weisen Tone die geringsten Durchlässigkeiten auf, wobei quellfähige Tone, wie z.B. Bentonite (Natrium-Montmorillonit, Calcium-Montmorillonit), besonders kleine  $k$ -Werte erreichen. Na-Bentonite besitzen eine stärkere Quellfähigkeit als Ca-Bentonite, werden aber in Europa überwiegend als chemisch aktivierte Na-Bentonite angeboten, die unter bestimmten Bedingungen mit der Zeit zu einem Austausch der mobileren Na-Ionen neigen, was zu einem Verlust an Quellfähigkeit führt. Im Hinblick auf die dauerhaft geringe Durchlässigkeit (Langzeitbeständigkeit) wird deshalb natürlicher Ca-Bentonit einem künstlich aktivierten Na-Bentonit vorzuziehen sein.

Eine Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k$  in Abhängigkeit von der Porenzahl  $e$ , der Ausrollgrenze  $w_p$  und der Plastizitätszahl  $I_p$  wird in [2] für Tone wie folgt angegeben:

$$k = 0,0174 * \frac{[(e-0,027*(w_p-0,242*I_p))/I_p]^{4,29}}{1+e} \quad [\text{m/s}]$$

In der angegebenen Formel ist  $w_p$  und  $I_p$  in % einzusetzen.

Aus [14] ist weiterhin bekannt, daß sich für künstlich verdichtete bindige Böden kleinste Durchlässigkeitsbeiwerte bei Verdichtungsgraden auf der nassen Seite der Proctorkurve erzielen lassen und demnach insbesondere kleine Luftporenanteile  $n_a$  des Materials für geringe Durchlässigkeiten maßgeblich sind. Mit Einbauwassergehalten unter dem Proctorwassergehalt werden hingegen bei vergleichbaren Trockendichten des Materials um Größenordnungen höhere Durchlässigkeitsbeiwerte erreicht.

Zusammenfassend kann aus den vorgenannten Angaben geschlossen werden, daß für die Mischung des Rohrauflagermaterials eine möglichst gut abgestufte Korngrößenzusammensetzung mit tonigem Feinanteil geringste Durchlässigkeiten erwarten läßt.

### 3.3 Festigkeit und Steifigkeit

Von umfangreichen Untersuchungen im Hinblick auf die Scherfestigkeit und Steifigkeit von nicht gebundenen gemischtkörnigen Böden wird in [15] und [16] berichtet. Scherfestigkeit und Steifigkeit werden bei diesen Korngemischen vom Porenanteil des Grobkorns und vom Anteil an Feinkorn bestimmt, wobei entscheidend ist, ob ein tragendes Grobkorngerüst vorhanden ist, oder ob das Grobkornmaterial in einer Feinkornmatrix schwimmt.

Bei mit Zementen gebundenen Mineralkorngemischen ist in der Regel die Festigkeit der Mischungszusammensetzung von dem Bindemittelgehalt, dem Einbauwassergehalt, der Korngrößenzusammensetzung und der Kornfestigkeit sowie der Anzahl der Korn-zu-Korn-Kontakte bzw. der Lagerungsdichte des Korngerüstes abhängig.

Da die hier zu untersuchenden Mischungszusammensetzungen nur vergleichsweise geringe Zementanteile von wenigen Masse-% bezogen auf die fertige Mischung aufweisen, liegen bei üblichen Einbauwassergehalten dieser feinkornreichen Mineralstoffmischungen von ca. 8 bis 18 % hohe Wasserzementwerte  $w/z > 2.5$  bis 5 vor. Für diese  $w/z$ -Werte muß von einer vollständigen Hydratation des Zements ausgegangen werden, die bekanntlich bereits ab  $w/z = 0.4$  gegeben ist [7].

Mit zunehmenden Einbauwassergehalten über dem Proctorwassergehalt nehmen die erreichbaren Verdichtungsgrade der Mischungen, wie auch die Festigkeit und Steifigkeit des sich ausbildenden Zementsteins ab. Beide Faktoren führen zu einer geringeren Festigkeit und Steifigkeit der erhärteten Mischung. Hierbei wird davon ausgegangen, daß

der Einfluß der jeweils erreichten Verdichtung des Korngemisches für die Festigkeit und Steifigkeit der erhärteten Mischung bestimmend ist.

Neben einem hohen Einbauwassergehalt und einer geringen Dichte des Korngemisches wirkt sich auch ein hoher Anteil an Feinkorn, insbesondere wenn es sich hierbei um Tonmineralien handelt, festigkeits- und steifigkeitsvermindernd auf die erhärtete Mischungszusammensetzung aus [5]. Dieses Feinkorn haftet der übrigen Zuschlagkörnung (hier Sand-Feinkies-Gemisch) an und vermindert die Verbundfestigkeit zwischen Zementstein und Zuschlag. Mit steigendem Tonanteil nimmt die Festigkeit und Steifigkeit der erhärteten Mischung ab. Die für die Mischung verwendeten Tonmineralien wirken sich in dem erhärteten Gemisch demnach als "Weichmacher" aus.

Auch aus der Injektionstechnik liegen vergleichbare Erfahrungen vor, wonach Ton-Zementsuspensionen immer deutlich geringere Festigkeiten als reine Zementsuspensionen aufweisen, und mit zunehmendem Tonanteil die Festigkeit von Ton-Zementsuspensionen abnimmt [11]. Für die Zugabe von Bentonit ist nach [11] erfahrungsgemäß eine nennenswerte Festigkeitsminderung ab Zugabemengen größer ca. 6 % gegeben. Genauere Zusammenhänge im Hinblick auf die Wechselwirkungen in Ton-Zementsuspensionen sind in [6], [17] und [22] beschrieben, wo u.a. anhand von mikroskopischen Untersuchungen ein Einfluß von Tonmineralien auf die Ausbildung der Zementsteinstruktur festgestellt worden ist.

Nach [5] führen insbesondere quellfähige Tonmineralien, zu einem erhöhten Schwinden und Quellen von gebundenen Mischungen. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang zu überdenken, ob z.B. trocken in die Mischung eingebrachter Bentonit durch Quellvorgänge nach der Wasserzugabe den gleichzeitig stattfindenden Verfestigungsprozeß des hydraulischen Bindemittels beeinträchtigt. Entsprechende Literatur bzw. Angaben zu vorliegenden Untersuchungsergebnissen konnten hierzu nicht gefunden werden. Es war deshalb Ziel der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens, bei den zu entwickelnden Mischungen mit einem möglichst kleinen Anteil an Bentonit auszukommen. Aus dem gleichen Grund wurden als Füller gering quellfähige Tonminerale (Kaolin) verwendet.



## 4 VORLIEGENDE ERFAHRUNGEN

### 4.1 Veröffentlichungen zum Thema Rohrauflagermaterial

Im Zusammenhang mit Anforderungen an das Rohrauflagermaterial für in der Deponiebasis verlegte Sickerrohrleitungen liegen aus den letzten Jahren entsprechende Veröffentlichungen vor [23], [8], [9], [10], [11], die abweichend von der bis dahin üblichen Praxis, diese Rohre direkt in den bindigen Bodenmaterialien der mineralischen Deponiebasisabdichtung zu verlegen, darauf hinwiesen, daß für die Rohrauflagerung ein standsicheres Material mit angepaßter Steifigkeit vorteilhaft ist. Entsprechende Hinweise gibt auch die DIN 19667 [4], die für die Rohrauflagerung ein standfestes, schwach durchlässiges Material, z.B. Sand mit der Korngrößenabstufung 0/2a vorsieht.

Zur Verringerung der Durchlässigkeit des genannten Sandmaterials wurde in der Vergangenheit mit Bentonit vergütetes Sandmaterial eingesetzt [10], was jedoch aufgrund seiner Wasserempfindlichkeit und durch Aufweichungen nach Wasserzutritt zu Standsicherheitsproblemen im Rohrbereich führen kann [1].

Von mit Bindemittel stabilisierten Rohrauflagermischungen wurde in [10] berichtet, wo die in der Tabelle 1 aufgeführten Mischungszusammensetzungen genannt wurden.

Sand	Füller Steinmehl	Tonmehl	Bindemittel
Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%
81	13	Bentonit 6	-
81	10	Bentonit 5	HOZ 4
74	15	Bentonit 6	HOZ 5
Chemoton (Dynagrout)			
80	15	Aktivbentonit 5	-

Tabelle 1: Beispiele von Mischungsrezepturen für Rohrauflagermaterialien aus [10]

### 4.2 Erfahrungen im Rahmen von Bauvorhaben

Neben den in Abschnitt 4.1 genannten Angaben lagen im Zusammenhang mit den vom Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München betreuten

Deponiebauvorhaben Benetsham und Hart a.d.Alz (Werksdeponien der SKW Trostberg) Erfahrungen mit gebundenen, bentonitvergüteten Sandmaterialien vor.

Bei den Deponien Benetsham und Hart a.d. Alz wurde zur Auflagerung der Sickerrohre in der Deponiebasis ein Gemisch aus 70 % Sand, 20 % Steinmehl (Diabas), 7 % Ca-Bentonit und 3 % Zement HOZ 35 L verwendet, das nach entsprechenden Eignungsuntersuchungen [5] 1992 eingebaut wurde. Als Einbauparameter waren ein Verdichtungsgrad von  $D_{pr} \geq 98$  % und ein Einbauwassergehalt von  $w = 16$  % vorgegeben. Die Proctordichte des Materials lag etwa bei  $\rho_{pr} = 1.840$  t/m<sup>3</sup> und der Proctorwassergehalt bei  $w_{pr} = 14.5$  %.

Die chargenweise Mischungsherstellung in einer Zwangsmischanlage sowie der lagenweise verdichtete Einbau des Materials konnten damals ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden.

Im August 1995 wurde auf der Deponie Benetsham ein Rohrauflagerbereich aufgedigelt, der nach Aussage des Deponiebetreibers zeitweise bis ca. 15 m hoch überschüttet war (vgl. Fotografien auf der Anlage 5 Blatt 1). Das Rohrauflagermaterial und die Rohrleitung befanden sich zu diesem Zeitpunkt in einwandfreiem Zustand. Aufweichungen, Rißbildungen oder sonstige Beschädigungen im Rohrauflagerbereich konnten im aufgedigelteten Bereich nicht festgestellt werden.

Aufgrund der zeitlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen war im Rahmen der 1991 durchgeführten Eignungsuntersuchungen nur ein reduzierter Untersuchungsumfang möglich, so daß weitere optimierende Untersuchungen auf diesem Gebiet als erforderlich angesehen wurden. Dies führte zu dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben.

### 4.3 Steifigkeitseigenschaften von Dränkies

Für die Abschätzung der Steifigkeitseigenschaften von Dränkies, insbesondere der in Deponien üblicherweise verwendeten Korngrößenabstufung 16/32 mm, finden sich in der Literatur, wie z.B. [19] und [23], Anhaltswerte, die sich allgemein auf eng gestufte Kiese bei mittlerer Lagerungsdichte beziehen. Um die spannungsabhängige Steifigkeit des sehr eng gestuften und weist locker gelagerten Dränkiesmaterials genauer abschätzen zu können, wurden an zwei Dränkiesproben mit der genannten Korngrößenabstufung

zwei Großkompressionsversuche jeweils bei lockerster und bei dichtester Lagerung des Kieses durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Bild 1 dargestellt.

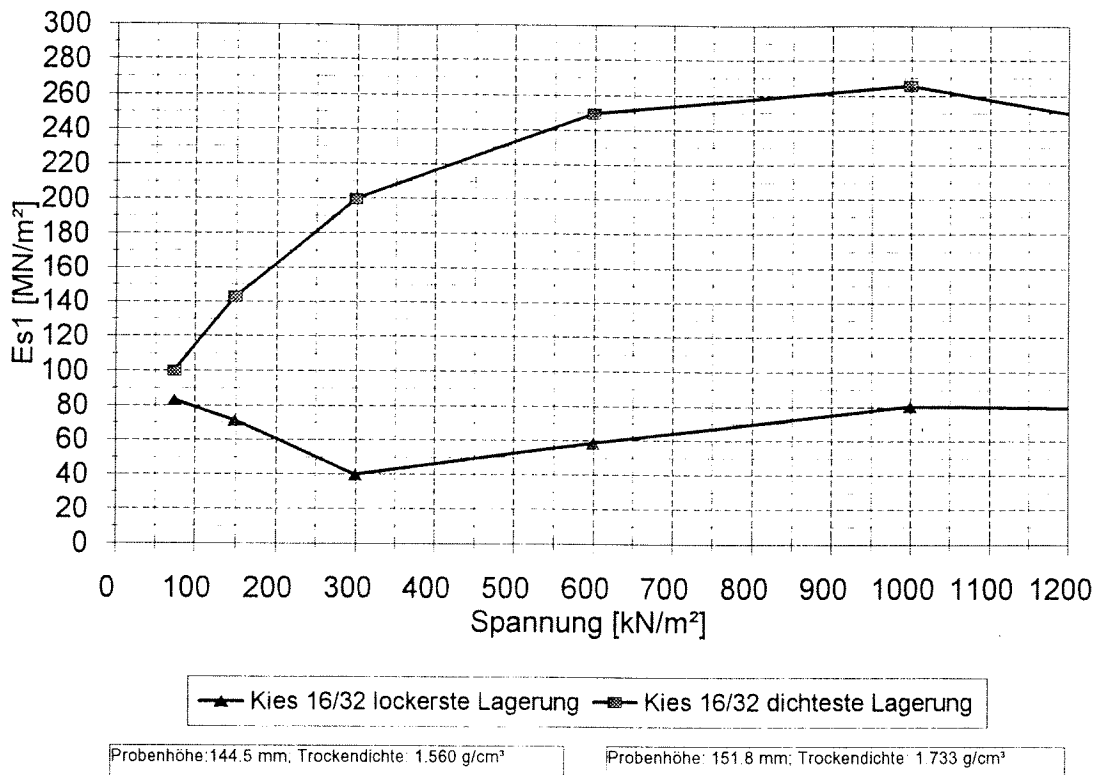


Bild 1: Steifemoduln  $E_{s1}$  aus der Erstbelastung des Kompressionsversuchs an Dränkies der Körnung 16/32 mm bei lockerster und dichtester Lagerung

Die Ergebnisse der beiden Kompressionsversuche fielen sehr unterschiedlich aus und weisen auf eine große Schwankungsbreite der Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte des Dränkiesmaterials bei Versuchsbeginn hin. Die Lagerungsdichte des Dränkieses beim Einbau in einer Deponie dürfte mehr einer lockeren bis mittleren Lagerung entsprechen, so daß in einem Spannungsbereich zwischen ca. 100 und 800 kN/m² die Steifemoduln in einer Größenordnung von ca.  $E_{s1} = 50$  bis 110 MN/m² abgeschätzt werden können.

## **5 AUSGANGSMATERIALIEN UND UNTERSUCHTE MISCHUNGSZUSAMMENSETZUNGEN**

### **5.1 Allgemeines**

Ausgehend von den bislang vorliegenden Erfahrungen kommen als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Rohrauflagermischungen gut abgestufter Quarzsand, kalkfreies Steinmehl, Tonmehl (Kaolin, Illit, Ca-Bentonit), Bindemittel (PZ, HOZ, Spezialbindemittel) und Wasser in Frage.

Im Hinblick auf die in Abschnitt 2 genannten Anforderungen an das Rohrauflagermaterial kann durch die Auswahl der Ausgangsmaterialien und mit einer gezielten Mischungszusammensetzung eine Optimierung der Mischungseigenschaften erreicht werden. Die Art und die Menge der einzelnen Mischungskomponenten wirken sich hierbei sehr unterschiedlich und teils gegenseitig beeinflussend auf die Eigenschaften der Rohrauflagermischung aus (vgl. Abschnitt 1). Die Anforderungen an die einzelnen Mischungskomponenten werden im folgenden erläutert.

### **5.2 Grundmaterial Sand**

Als Grundmaterial für die Rohrauflagermischung sind grundsätzlich Sande zu verwenden, die keine löslichen Salze oder Kalke enthalten (z.B. Quarzsande). Eine gute, weitgestufte Korngrößenverteilung verleiht dem Korngerüst aufgrund vieler Korn-zu-Korn-Kontakte günstige Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften, macht es suffusionsstabil und ist günstig im Hinblick auf eine geringe Durchlässigkeit der Mischung. Ein Grobkornanteil im Bereich der Feinkiesfraktion verbessert die Ungleichförmigkeit der Sandmischung, wobei der Größtkorndurchmesser abhängig vom Gesamtfeinanteil der fertigen Mischung in jedem Fall kleiner ca. 8 mm sein sollte. Wegen möglicher Kerbwirkung an der Rohrleitung sind Korngemische mit natürlich gerundeten Kornformen überwiegend plattigen oder stengeligen Kornformen, wie sie bei groben Brechsanden auftreten, vorzuziehen.

Mit Sanden, die einen geringen Eigenfeinanteil aufweisen, können nach der Zugabe von Tonmehlen Mischungen mit geringsten Durchlässigkeiten und günstigen, nicht zu steifen Eigenschaften hergestellt werden (vgl. Abschnitt 3.3 und 4.3).

Aus diesen Überlegungen heraus wurde für das Forschungsvorhaben ein Sand- / Feinkiesgemisch mit Korngrößen zwischen 0 und 4 mm (Lieferkörnung 0/4a mm nach DIN 4226 Teil 1, Zuschlag für Beton, Zuschlag mit dichtem Gefüge) gewählt.

Bild 2 zeigt die Korngrößenverteilung des im Rahmen des Forschungsvorhabens verwendeten Sandes.

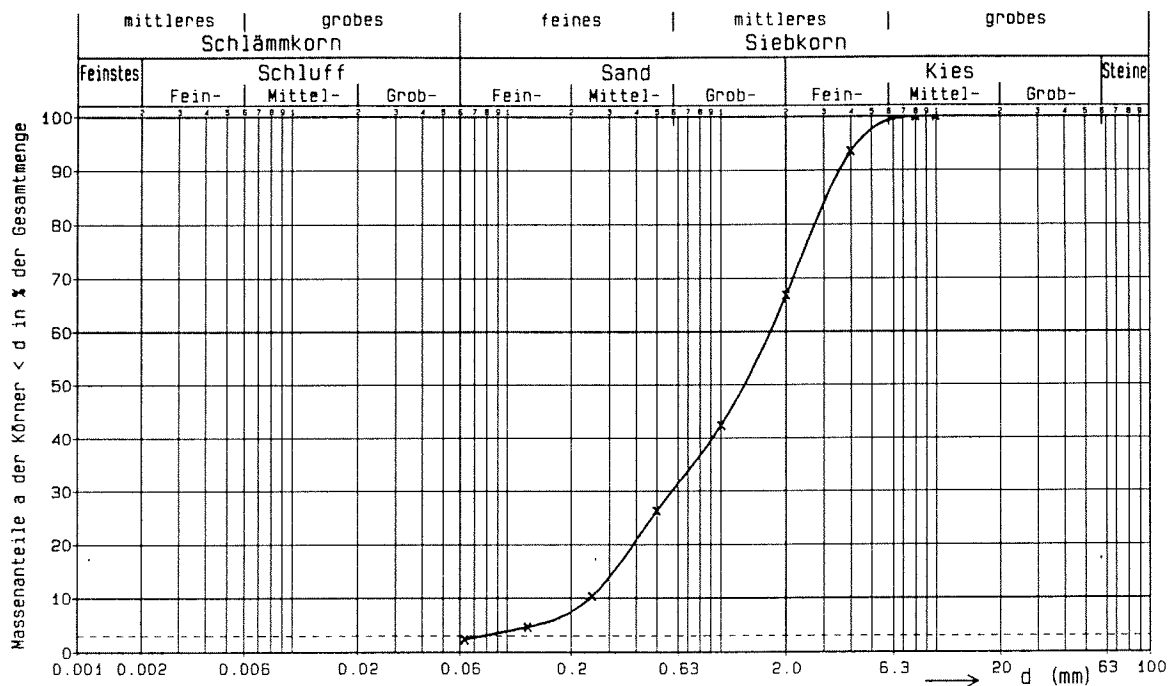


Bild 2: Korngrößenverteilung des verwendeten Sandes 0/4a mm nach DIN 4226 Teil 1

### 5.3 Porenfüller (Steinmehl, Tonmehl)

Die eigentliche Vergütung des Sandes im Hinblick auf eine geringe Durchlässigkeit der Rohrauflagermischung erfolgt durch die Zugabe eines Porenfüllers, der grundsätzlich entweder aus kalkfreiem Steinmehl (z.B. Diabas) und / oder aus Tonmehl bestehen kann.

Mischungen, bei denen als Füller überwiegend Steinmehl und zur Verbesserung der Dichtwirkung Bentonit zugegeben wird, reagieren erfahrungsgemäß im Hinblick auf ihre Dichtigkeit gegenüber Schwankungen im Einbauwassergehalt empfindlich [5]. Ausreichend geringe Durchlässigkeiten lassen sich mit diesen Mischungen erst bei Einbauwassergehalten, die deutlich über dem Proctoroptimum liegen, erreichen.

Werden als Füller Tonmehle verwendet, so ist aufgrund ihrer im Vergleich zu Steinmehlen größeren Dichtigkeit auch eine geringere Durchlässigkeit der Rohrauflagermischung zu erwarten. Weitere Aspekte hinsichtlich der Durchlässigkeit sowie der Steifigkeit und der Festigkeit der Mischungen wurden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschrieben.

Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens als Füller verwendete Tonmehl bestand überwiegend aus kaum quellfähigem Kaolinit (80 bis 85 %). Die Fließgrenze  $w_L$  und die Ausrollgrenze  $w_p$  sowie die Plastizitätszahl  $I_p$  (nach DIN 18122) und die Korngrößenverteilung dieses ausgeprägt plastischen Tonmehls (TA nach DIN 18196) sind in Bild 3 angegeben.

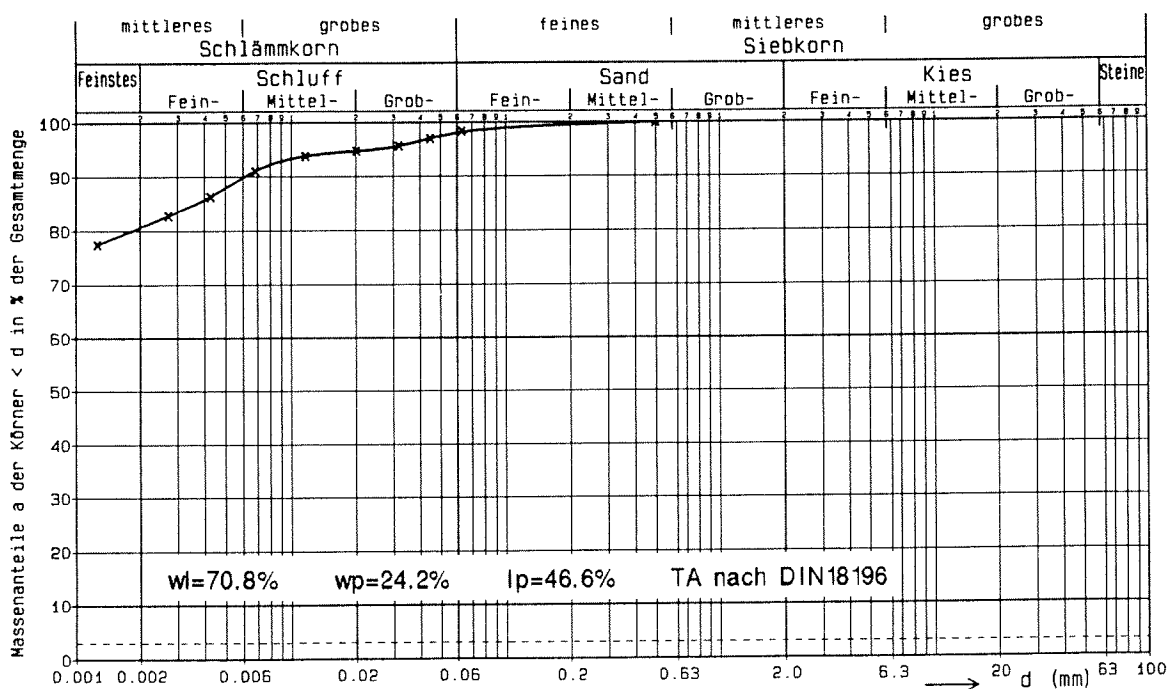


Bild 3: Bodenmechanische Kenngrößen des als Füller verwendeten Kaolin-Tonmehles

Die Eigenschaften des im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verwendeten Bentonites können der nachfolgenden Zusammenstellung entnommen werden. Aus den in Abschnitt 3.2 genannten Gründen (möglicher Ionenaustausch) wurde im Hinblick auf eine dauerhaft geringe Durchlässigkeit (Langzeitbeständigkeit) der Rohrauflagermischung ein natürlicher Ca-Bentonit verwendet.

Fließgrenze:	$w_L = 115 \%$	DIN 18122
Ausrollgrenze:	$w_p = 33 \%$	DIN 18122
Plastizitätszahl:	$I_p = 82 \%$	DIN 18122
Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff:	$w_A = 160 \%$	DIN 18132

## 5.4 Bindemittel

Das Bindemittel, das der Rohrauflagermischung auch bei Wasserzutritt eine gleichbleibende Steifigkeit und Festigkeit verleihen soll, ist in einer Deponie außer der mechanischen Beanspruchung auch anderen Einflüssen, wie chemischem Angriff, Temperatur und Feuchtigkeitsschwankungen, ausgesetzt. Deshalb ist in jedem Fall ein Bindemittel zu wählen, das diesen Beanspruchungen unbeschadet widerstehen kann. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde deshalb neben den 2 Spezialbindemitteln "Aquament" und Protomix C" der Firma Heidelberger Zement, wie sie im Dichtwandbau auch zur Abkapselung von Altdeponien Verwendung finden, ein langsam abbindender Hochofenzement HOZ 35 L nach DIN 1164 Teil 1 (bzw. CEM III/B 32.5) verwendet.

Für die Bauausführung sind langsam abbindende Bindemittel günstig, da sie längere Verarbeitungszeiten ermöglichen.

## 5.5 Mischungszusammensetzungen

Im Zusammenhang mit der begleitenden Überwachung von Deponiebaumaßnahmen und den dort durchgeführten Untersuchungen war bekannt, daß Rohrauflagermischungen aus Sand, Füller (Steinmehl), Bentonit und Zement bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten im Hinblick auf ihre Druckfestigkeit, Steifigkeit und Durchlässigkeit empfindlich reagieren. Mit diesen Mischungen wurden ausreichend geringe Durchlässigkeiten erst bei vergleichsweise hohen Einbauwassergehalten erreicht (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.2).

Zunächst war es deshalb Ziel der Untersuchungen, eine Mischung herzustellen, die auch bei Schwankungen im Einbauwassergehalt gleichbleibend, ausreichend geringe Durchlässigkeiten aufweist. Aus diesem Grund wurde das bislang für Rohrauflagermischungen üblicherweise als Füller verwendete Steinmehl (vgl. Abschnitt 4.1) durch Kaolin-Tonmehl mit besserer Dichtwirkung ersetzt.

Da sich Mischungszusammensetzungen mit 5 und mehr % Zementanteil als zu steif erwiesen hatten [5], wurden die ersten Untersuchungen mit einem Zementanteil von 4 % durchgeführt.

Darüber hinaus sind auch Untersuchungen an dem Fertigprodukt Depomix 20 der Firma IBECO durchgeführt worden, dem zur Verbesserung der Festigkeit und Steifigkeit 2 % des vorgenannten Hochofenzements zugegeben wurde (vgl. Mischung M3).

Insgesamt wurden mit den in Abschnitt 5.2 bis 5.4 beschriebenen Ausgangsmaterialien im Rahmen des Forschungsvorhabens 9 verschiedene Mischungen mit den Bezeichnungen M1 bis M9 untersucht, deren Zusammensetzungen in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengestellt sind. Die an den Mischungen durchgeführten Untersuchungen sind ebenfalls in der Tabelle angegeben (vgl. hierzu insbesondere Abschnitt 7).

### Untersuchte Mischungen FE-Rohraufleger:

Untersuchungen: (M1 bis M5)	Druckfestigkeit nach DIN 18136 Elastizitätsmodul nach DIN 18196 Durchlässigkeit nach DIN 18130 Verarbeitbarkeit (qualitativ)			
<b>Mischung:</b>	<b>1</b>	<b>Mischung:</b>	<b>2</b>	
Sand [%]:	75	Sand [%]:	75	
Tonmehl (Kaolin) [%]:	15	Tonmehl (Kaolin) [%]:	15	
Ca-Bentonit [%]:	6	Ca-Bentonit [%]:	8	
Zement HOZ 35L [%]:	4	Zement HOZ 35L [%]:	2	
<b>Mischung:</b>	<b>3</b>	<b>Mischung:</b>	<b>4</b>	<b>Mischung:</b>
Depomix 20 [%]:	98	Sand [%]:	72,5	Sand [%]:
Zement [%]:	2	Tonmehl (Kaolin) [%]:	18	Tonmehl (Kaolin) [%]:
		Ca-Bentonit [%]:	7	Ca-Bentonit [%]:
		Zement HOZ 35L [%]:	2,5	Zement HOZ 35L [%]:
				3
Untersuchungen: (M6 bis M9) <small>* nicht an allen Mischungen</small>	Druckfestigkeit nach DIN 18136 Elastizitätsmodul nach DIN 18196 Durchlässigkeit nach DIN 18130 Trocken-Naßwechsel Wasserlagerung Erosion Steifemodul* Triaxialversuch nach DIN 18137 Teil2* Verarbeitbarkeit (qualitativ)			
<b>Mischung:</b>	<b>6</b>	<b>Mischung:</b>	<b>7</b>	
Sand [%]:	70	Sand [%]:	70	
Tonmehl (Kaolin) [%]:	20	Tonmehl (Kaolin) [%]:	20	
Ca-Bentonit [%]:	7	Ca-Bentonit [%]:	7	
Zement HOZ 35L [%]:	3	Aquament [%]:	3	
<b>Mischung:</b>	<b>8</b>	<b>Mischung:</b>	<b>9</b>	
Sand [%]:	70	Sand [%]:	70	
Tonmehl (Kaolin) [%]:	20	Tonmehl (Kaolin) [%]:	27	
Ca-Bentonit [%]:	7	Ca-Bentonit [%]:	0	
Protomix C [%]:	3	Zement HOZ 35L [%]:	3	

Tabelle 2: Untersuchte Mischungszusammensetzungen M1 bis M9



## 6 UNTERSUCHUNGSMETHODE

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, sind als wichtigste Eigenschaften des Rohrauflagermaterials seine Festigkeit, Steifigkeit, Durchlässigkeit, Wasserbeständigkeit und Erosionssicherheit zu nennen. Die Festigkeit, Steifigkeit und die Durchlässigkeit einer Mischung wurden als Leitparameter gewählt und mit einaxialen Druckversuchen in Anlehnung an DIN 18136 und Durchlässigkeitsversuchen gemäß DIN 18130 untersucht (vgl. Abschnitte 7.3 und 7.5). Hierbei diente der einaxiale Druckversuch zur schnellen überschlägigen Abschätzung der Größenordnung von Festigkeit und Steifigkeit der gebundenen Materialgemische. Die Prüfungen fanden jeweils an eigens mit Einbauwassergehalten von  $w = 9, 12, 15, 18$  und  $21\%$  mit konstanter Verdichtungsarbeit hergestellten Prüfkörpern 7 und 14 sowie 28 Tage nach der Prüfkörperherstellung statt.

Ausgehend von vorliegenden Angaben und Erfahrungen (vgl. Abschnitte 3 und 4) und auf der Grundlage der Ergebnisse aus den vorgenannten Untersuchungen wurden der Massenanteil an Sand und Füller sowie der Anteil an Bindemittel systematisch variiert. Nur an Mischungszusammensetzungen, die aufgrund der ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten, E-Moduln und Durchlässigkeiten günstig zu beurteilen waren (vgl. Abschnitt 2), wurden anschließend weitergehende Untersuchungen hinsichtlich ihrer Widerstandsfähigkeit bei Wasserlagerung (vgl. Abschnitt 7.8), Trocken-Naß-Wechseln (vgl. Abschnitt 7.7), Erosionsbeanspruchung (vgl. Abschnitt 7.9) sowie aufwendigere Versuchsanordnungen zur Bestimmung ihrer Festigkeit und Zusammendrückbarkeit (Triaxiale Druckprüfungen nach DIN 18137 Teil 2: vgl. Abschnitt 7.4 und Kompressionsversuche in Anlehnung an den Entwurf der DIN 18135: vgl. Abschnitt 7.6) durchgeführt.

## 7 UNTERSUCHUNGEN

### 7.1 Herstellung und Verarbeitbarkeit der Materialmischung

Für die Herstellung der einzelnen Mischungen wurde zunächst das Sandmaterial getrocknet und der Eigenwassergehalt der Mischungskomponenten Tonmehl, Bentonit und Bindemittel bestimmt. Die zuvor festgelegten Massenanteile der einzelnen Mischungskomponenten wurden in einem Zwangsmischer 2 Minuten lang trocken gemischt und anschließend soviel Wasser zugegeben, daß der jeweils vorgesehene Einbauwassergehalt

von  $w = 9, 12, 15, 18$  und  $21 \%$  erreicht wurde. Die Mischzeit nach Wasserzugabe betrug 5 Minuten.

Bei der Herstellung der Mischungen wurde die Verarbeitbarkeit sowohl der Ausgangsmaterialien als auch der fertigen Mischung beurteilt und mittels Fotografien dokumentiert (vgl. Anlage 2).

## 7.2 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Das gemäß Abschnitt 7.1 mit einem vorbestimmten Wassergehalt hergestellte Rohrauflagermaterial wurde unmittelbar nach der 5-minütigen Mischung im Zwangsmischer mit der beim Proctorversuch vorgesehenen einfachen Verdichtungsarbeit ( $0.6 \text{ MNm/m}^3$ ) in 3 Lagen in den Proctortopf mit einem Innendurchmesser von 10 cm eingestampft. Die so hergestellten zylindrischen Prüfkörper wiesen einen Durchmesser von 10 cm und eine Höhe von ca. 12 cm auf. Die für die unterschiedlichen Untersuchungen erforderlichen Prüfkörperhöhen wurden anschließend durch beidseitigen gleichmäßigen Abgleich der Prüfkörper hergestellt (siehe hierzu Abschnitte 7.3 bis 7.9).

Da das Materialgemisch zur Herstellung der Prüfkörper mit unterschiedlichen Einbauwassergehalten bei jeweils konstanter Verdichtungsarbeit eingestampft wurde, wiesen die Prüfkörper bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten auch jeweils unterschiedliche Dichten auf.

Bis zur jeweiligen Prüfung nach 7, 14 bzw. 28 Tagen wurden die fertigen Prüfkörper bei ca.  $20^\circ\text{C}$  feucht gelagert.

## 7.3 Einaxialer Druckversuch in Anlehnung an DIN 18136

Zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit betrug die Höhe  $h$  der zylindrischen Prüfkörper  $h = 10 \text{ cm}$  und das Verhältnis der Prüfkörperhöhe zum Prüfkörperdurchmesser  $h:d = 1:1$ . Die Durchführung der einaxialen Druckversuche erfolgte in Anlehnung an DIN 18136 mit einer konstanten axialen Verformungsgeschwindigkeit  $\varepsilon_1^\circ = 0.2 \text{ \%/min}$ . Der E-Modul der Proben wurde als Sekantenmodul im Spannungsbereich zwischen  $\sigma_1 = 200$  und  $600 \text{ kN/m}^2$  ermittelt.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad [\text{MN/m}^2]$$

Die einaxialen Druckversuche wurden 7, 14 und 28 Tage nach der Prüfkörperherstellung durchgeführt.

#### 7.4 Triaxialversuch nach DIN 18137 Teil 2

Zur Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter  $\varphi'$  und  $c'$  wurden Dreiaxiale Druckversuche an zylindrischen Prüfkörpern mit einer Prüfkörperhöhe  $h = 10$  cm und einem Verhältnis der Prüfkörperhöhe  $h$  zum Prüfkörperdurchmesser  $d$  von  $h:d = 1:1$  nach DIN 18137 Teil 2 durchgeführt. Es handelte sich um konsolidierte, undrainede Versuche mit Messung der Porenwasserdrücke nach der Mehrstufentechnik, wobei die Endflächenreibung durch besondere Maßnahmen stark reduziert war. Jeweils einer von 3 gleichartigen Prüfkörpern 1 bis 3, die alle gleiche Mischungszusammensetzung, gleichen Einbauwassergehalt und gleiches Prüfkörperalter aufwiesen, wurde bei Konsolidationsspannungen  $\sigma_c'$  (bzw. Seitendruckspannung  $\sigma_3'$ ) von

$$\begin{aligned}\sigma_{3-1}' &= 60 / \sigma_{3-2}' = 120 / \sigma_{3-3}' = 200 \text{ kN/m}^2 && \text{(Prüfkörper 1),} \\ \sigma_{3-1}' &= 120 / \sigma_{3-2}' = 200 / \sigma_{3-3}' = 280 \text{ kN/m}^2 && \text{(Prüfkörper 2) und} \\ \sigma_{3-1}' &= 200 / \sigma_{3-2}' = 280 / \sigma_{3-3}' = 360 \text{ kN/m}^2 && \text{(Prüfkörper 3) geprüft.}\end{aligned}$$

Der Sättigungsdruck  $u_0$  betrug bei allen Triaxialversuchen  $u_0 = 400$  kN/m<sup>2</sup>.

Aufgrund der aufwendigen Versuchsdurchführung wurden Triaxialversuche nur an 28 Tage alten Prüfkörpern aus ausgewählten Mischungszusammensetzungen (Mischungen M6 und M9) durchgeführt.

#### 7.5 Bestimmung der Durchlässigkeit nach DIN 18130

Die zylindrischen Prüfkörper zur Bestimmung der Durchlässigkeit wiesen eine Höhe  $h$  von  $h = 5$  cm und ein Verhältnis der Prüfkörperhöhe  $h$  zum Prüfkörperdurchmesser  $d$  von  $h:d = 1:2$  auf. Die Durchlässigkeitsuntersuchungen wurden nach DIN 18130-TX-DE-ST-UO durchgeführt. Der allseitig wirkende Sättigungsdruck betrug 5.0 bar, der Probeninnendruck 4.5 bar. Die Versuche wurden mit veränderlichem Druckgefälle durchgeführt, wobei die in den Tabellen der Anlage 1 angegebenen hydraulischen Gradienten  $i$  durchlaufen wurden. Nach dem Versuch wurde die Qualität des Prüfkörpers manuell hinsichtlich evtl. Aufweichungen untersucht.

Die Durchlässigkeitsuntersuchungen fanden an jeweils unterschiedlichen Prüfkörpern 14 und 28 Tage nach der Prüfkörperherstellung statt.

### **7.6 Kompressionsversuch in Anlehnung an DIN 18135 (Entwurf)**

Für die Kompressionsversuche wurden zylindrische Prüfkörper mit einer Höhe von 6 cm und einem Durchmesser von 10 cm hergestellt. Das Verhältnis der Prüfkörperhöhe zum Prüfkörperdurchmesser betrug  $h:d = 1:1.67$ . Besonderes Augenmerk wurde auf das saute Einpassen des Prüfkörpers in den Probenring gelegt. Es wurden jeweils 6 Laststufen mit 50, 100, 200, 400, 800 und 1200 kN/m<sup>2</sup> Vertikalspannung aufgebracht und das vollständige Abklingen der Verformungen abgewartet. Eine Zweitbelastung erfolgte nicht. Während des Versuches wurde den Proben von beiden Seiten Wasser zugegeben und am Versuchsende die Trockenmasse und der Endwassergehalt bestimmt.

Bei keinem der Prüfkörper wurde eine Zerstörung der Probe festgestellt.

### **7.7 Trocken-Naß-Wechselversuch**

Beim Trocken-Naß-Wechselversuch wurden 28 Tage alte Prüfkörper bei konstant 40°C bis auf jeweils ca. 2 bis 3 % Restwassergehalt getrocknet und anschließend zunächst eine Stunde lang bis zur halben Probenhöhe in 40°C warmes Wasser getaucht. Danach sind die Prüfkörper für 23 Stunden vollständig unter Wasser bei 40°C gelagert worden. Es folgte die abermalige Trocknung wie angegeben. Während 10 Trocken-Naß-Zyklen wurde der Zerfall der Probekörper beobachtet und nach der 11. Trocknung, sofern noch möglich, abschließend die einaxiale Druckfestigkeit der Probekörper bestimmt. Hinsichtlich der Prüfkörperform siehe Abschnitt 7.3. Fotografien von ausgewählten Prüfkörpern sind auf der Anlage 4 zusammengestellt.

### **7.8 Wasserlagerung**

Für die Untersuchung des Materialverhaltens bei Wasserlagerung wurden die Prüfkörper nach 28-tägiger Feuchtlagerung vollständig in 40°C-warmes Wasser eingetaucht und deren Wasseraufnahme beobachtet, die meist nach ca. 2 bis 3 Tagen abgeschlossen war. Die Wasserlagerung dauerte 7 Tage bei konstant 40°C Wassertemperatur und wurde mit der Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit des Probekörpers, insgesamt

35 Tage nach der Prüfkörperherstellung, abgeschlossen. Hinsichtlich der Prüfkörperform siehe Abschnitt 7.3

## 7.9 Erosionsversuch

Die zylindrischen Prüfkörper für den Erosionsversuch wurden mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 5 cm hergestellt. In der Prüfkörperachse wurde bereits unmittelbar nach der Prüfkörperherstellung ein Loch mit 5 mm Durchmesser gebohrt. Nach 28 Tagen Feuchtlagerung bei 20°C sind die Prüfkörper bis zur Gewichtskonstanz unter Wasser gelagert worden und wurden anschließend in einer speziellen Durchströmungszelle in gleichkörnigen Sand mit Korndurchmesser 1 mm beidseitig eingebettet. Die Durchströmung der Prüfkörper durch die genannte Bohrung erfolgte 5 Tage lang mit 5 mWS (WasserSäule) und anschließend weitere 5 Tage mit 10 mWS Druckdifferenz zwischen Einström- und Ausströmseite. Anschließend wurden die Erosionen im Bereich der Bohrung auf Fotografien festgehalten.

# 8 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

## 8.1 Allgemeines

Für die Wertung der nachfolgend beschriebenen Untersuchungsergebnisse sind die folgenden Aspekte und die bei den Untersuchungen gemachten allgemeinen Beobachtungen von Bedeutung:

Die Untersuchungsergebnisse sind nicht nur von den in der jeweiligen Mischung enthaltenen Feststoffanteilen und -arten, sondern auch vom jeweiligen Einbauwassergehalt bei der Prüfkörperherstellung sowie insbesondere von der Dichte der einzelnen Prüfkörper abhängig. Die Prüfkörperdichten sind aufgrund der bei der Prüfkörperherstellung jeweils konstanten Verdichtungsarbeit (vgl. Abschnitt 7.2) für die verschiedenen Einbauwassergehalte unterschiedlich. Die Prüfkörpersteifigkeiten und -festigkeiten einer Mischung nehmen mit der jeweiligen Dichte des Prüfkörpers ebenfalls zu (vgl. beispielhaft Bild 8 und 16).

Infolge des Verfestigungsprozesses nehmen die Durchlässigkeiten mit zunehmendem Prüfkörperalter ab; die Steifigkeiten und Festigkeiten der Prüfkörper nehmen mit

zunehmendem Alter zu. Die Festigkeitsentwicklung ist bei den hier untersuchten Mischungszusammensetzungen in der Regel nach 28 Tagen weitgehend abgeschlossen.

## 8.2 Mischung M1

Bei Mischung M1 handelt es sich um ein Gemisch aus 75 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 15 % Tonmehl (Kaolinit), 6 % Ca-Bentonit und 4 % Zement HOZ 35 L.

Die Proctordichte der Mischung M1 betrug  $\rho_{Pr} = 2.060 \text{ t/m}^3$  und der zugehörige Proctorwassergehalt  $w_{Pr} = 11.5 \%$ . Die Mischung war bis zu einem Wassergehalt von ca.  $w = 14$  bis  $15 \%$ , d.h.  $w = w_{Pr} + 3 \%$  gut verarbeitbar. Bei höheren Einbauwassergehalten wurde Klumpenbildung sowie eine zunehmend schlechtere Verdichtbarkeit festgestellt, was an dem starken Abfall der Trockendichte  $\rho_d$  der Prüfkörper erkennbar ist (vgl. Anlage1 Blatt 1).

An Prüfkörpern der Mischung M1 wurden einaxiale Druckversuche und Durchlässigkeitsversuche jeweils 7 bzw. 14 Tage nach der Prüfkörperherstellung durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen in der Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 1 zusammengefaßt.

Die an den Prüfkörpern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen für Einbauwassergehalte über dem Proctorwassergehalt von  $w_{Pr} = 11.5 \%$  nach 7 Tagen bereits bei  $k < 3.9 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  und nach 14 Tagen bei  $k < 9.3 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$  und damit deutlich unter dem angestrebten Höchstwert von  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ . Die im Rahmen der einaxialen Druckversuche ermittelten E-Moduln von ausreichend undurchlässigen Prüfkörpern  $E > 230 \text{ MN/m}^2$  (nach 14 Tagen) ließen jedoch eine zu große Steifigkeit dieser Mischungszusammensetzung erwarten, so daß Mischung M1 ausgeschieden wurde und für die weitere Mischung M2 der Bentonitanteil auf Kosten des Zementanteils um 2 % erhöht wurde.

## 8.3 Mischung M2

Bei Mischung M2 handelt es sich um ein Gemisch aus 75 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 15 % Tonmehl (Kaolinit), 8 % Ca-Bentonit und 2 % Zement HOZ 35 L.

Die Proctordichte der Mischung M2 betrug  $\rho_{pr} = 1.969 \text{ t/m}^3$  und der zugehörige Proctorwassergehalt  $w_{pr} = 11.5 \%$ . Die Mischung war bis zu einem Wassergehalt von ca.  $w = 15 \%$ , d.h.  $w = w_{pr} + 3.5 \%$  gut verarbeitbar. Bei höheren Einbauwassergehalten wurde Klumpenbildung sowie eine zunehmend schlechtere Verdichtbarkeit festgestellt, was an dem starken Abfall der Trockendichte  $\rho_d$  der Prüfkörper erkennbar ist (vgl. Anlage 1 Blatt 1).

An Prüfkörpern der Mischung M2 wurden einaxiale Druckversuche und Durchlässigkeitsversuche jeweils 7 bzw. 14 Tage nach der Prüfkörperherstellung durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen in der Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 1 zusammengefaßt.

Die an den Prüfkörpern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen für Einbauwassergehalte über dem Proctorwassergehalt von  $w_{pr} = 11.5 \%$  nach 7 Tagen bereits bei  $k < 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  und nach 14 Tagen bei  $k < 3.8 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  und damit unter dem angestrebten Höchstwert von  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ . Die im Rahmen der einaxialen Druckversuche ermittelten E-Moduln von ausreichend undurchlässigen Prüfkörpern  $13 < E < 94 \text{ MN/m}^2$  (nach 14 Tagen) ließen allerdings insgesamt eine zu geringe Steifigkeit dieser Mischungszusammensetzung erwarten, so daß Mischung M2 ebenfalls ausgeschieden wurde.

#### 8.4 Mischung M3

Mit der Mischung M3 wurde das Produkt Depomix 20 der Firma IBECO unter Zugabe von 2 % Zement HOZ 35 L untersucht. Bei dem genannten Produkt handelt es sich um ein speziell für die Auflagerung von Sickerrohrleitungen konzipiertes Material. Gemäß Firmenangaben besteht das Produkt überwiegend aus quarzitischem Material (> 75 %) und Tonmineralien.

Die Proctordichte der mit Zement versetzten Mischung M3 betrug  $\rho_{pr} = 1.990 \text{ t/m}^3$  und der zugehörige Proctorwassergehalt  $w_{pr} = 10.3 \%$ . Die Mischung war bis zu einem Wassergehalt von ca.  $w = 14 \%$ , d.h.  $w = w_{pr} + 3.7 \%$  gut verarbeitbar. Bei Wassergehalten über 14 % wurde Klumpenbildung und ab ca. 18 % der Übergang zu einer zähen Masse sowie eine zunehmend schlechtere Verdichtbarkeit festgestellt. Auch hier

fällt die Trockendichte  $\rho_d$  der Prüfkörper bei höheren Wassergehalten stark ab (vgl. Anlage 1 Blatt 2).

An Prüfkörpern der Mischung M3 wurden einaxiale Druckversuche und Durchlässigkeitsversuche 14 Tage nach der Prüfkörperherstellung durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen in der Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 2 zusammengestellt.

Die an den Prüfkörpern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen für Einbauwassergehalte über dem Proctorwassergehalt von  $w_{pr} = 10.3 \%$  nach 14 Tagen bei  $k < 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  und damit unter dem angestrebten Höchstwert von  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ . Die im Rahmen der einaxialen Druckversuche ermittelten E-Moduln von ausreichend undurchlässigen Prüfkörpern  $5 \leq E \leq 156 \text{ MN/m}^2$  (nach 14 Tagen) ließen bei 2 % Zementzugabe noch eine zu geringe Steifigkeit dieser Mischungszusammensetzung erwarten. Eine weitere Mischung auf der Basis des Produkts Depomix 20 mit 3 % Zementzugabe wurde nicht untersucht. Im Vergleich mit den an Mischung M9 ermittelten Versuchsergebnissen aus den Durchlässigkeitsuntersuchungen konnte jedoch ein ähnliches Verhalten der Mischung M3 festgestellt werden. Weitere Untersuchungen mit höheren Zementanteilen könnten auch für das Produkt Depomix 20 zu brauchbaren Ergebnissen führen.

## 8.5 Mischungen M4 und M5

Mit den Mischungen M4 und M5 wurde ausgehend von der Mischung M2 der Anteil an Kaolin-Tonmehl und der Zementanteil in der Mischung bei gleichzeitiger Reduzierung des Sandanteils erhöht. Es sollte hierdurch eine Vergleichmäßigung der Versuchswerte in Abhängigkeit von Schwankungen im Einbauwassergehalt erreicht werden.

Die Mischung M4 bestand aus 72.5 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 18 % Tonmehl (Kaolinit), 7 % Ca-Bentonit und 2.5 % Zement HOZ 35 L. Für die Mischung M5 wurden 72 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 18 % Tonmehl (Kaolinit), 7 % Ca-Bentonit und 3 % Zement HOZ 35 L verwendet.

Die Proctordichten der Mischungen M4 und M5 betragen  $\rho_{pr} = 1.986$  und  $1.960 \text{ t/m}^3$  sowie die zugehörigen Proctorwassergehalte  $w_{pr} = 12.0$  und  $11.0 \%$ . Beide Mischungen waren bis zu einem Wassergehalt von ca.  $w = 14$  bis  $15 \%$ , d.h.  $w = w_{pr} + 2$  bis



3 % gut verarbeitbar. Bei höheren Einbauwassergehalten wurde auch hier Klumpenbildung sowie eine zunehmend schlechtere Verdichtbarkeit festgestellt (vgl. starken Abfall der Trockendichte  $\rho_d$  der Prüfkörper auf Anlage 1 Blatt 2).

An Prüfkörpern der Mischungen M4 und M5 wurden einaxiale Druckversuche und Durchlässigkeitsversuche jeweils 14 Tage nach der Prüfkörperherstellung durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen in der Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 2 zusammengefaßt.

Die an den Prüfkörpern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen für Einbauwassergehalte über dem Proctorwassergehalt von  $w_{pr} = 12.0$  bzw.  $11.0$  % nach 14 Tagen bei  $k < 1.0 \cdot 10^{-10}$  bzw.  $6.2 \cdot 10^{-11}$  m/s und damit unter dem angestrebten Höchstwert von  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s. Die im Rahmen der einaxialen Druckversuche ermittelten E-Moduln lagen nach 14 Tagen bei Mischung M4 (2.5 % Zementzugabe) zwischen  $17 \leq E \leq 107$  MN/m<sup>2</sup> und bei Mischung M5 zwischen  $28 \leq E \leq 205$  MN/m<sup>2</sup> (3.0 % Zementzugabe). Diese Ergebnisse ließen bei mehrachsiger Beanspruchung für die Mischung M4 eine zu geringe und bei der Mischung M5 etwas zu hohe Steifigkeiten im baupraktisch interessanten Bereich des Einbauwassergehaltes zwischen ca.  $w = 12$  % bis  $14$  % erwarten. Deshalb wurde für die Mischung M6 unter Beibehaltung eines Zementanteils von 3 % (vgl. M5) der Anteil an Kaolin-Tonmehl erhöht, was erwartungsgemäß zu einem ausgeglicheneren Steifigkeitsverhalten der Mischung führen sollte.

## 8.6 Mischung M6

Gemäß den an den Mischungen M1 bis M5 ermittelten Untersuchungsergebnissen wurden von der Mischung M6 (70 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 20 % Tonmehl (Kaolinit), 7 % Ca-Bentonit und 3 % Zement HOZ 35 L; vgl. Korngrößenverteilung auf Bild 4) die im Hinblick auf die in Abschnitt 2 formulierten Anforderungen an das Rohrauflagermaterial günstigsten Eigenschaften erwartet.

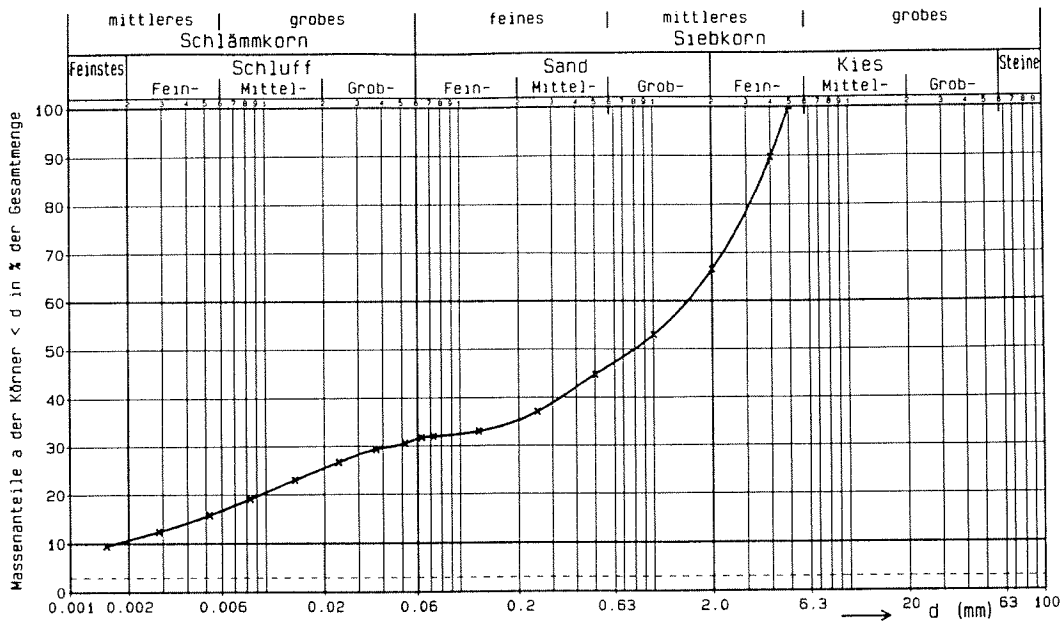


Bild 4: Korngrößenverteilung der Mischung M6

Aus diesem Grund wurden an der Mischung M6 neben den bislang durchgeführten einaxialen Druckversuchen und Durchlässigkeitsversuchen zusätzlich Kompressionsversuche, Triaxialversuche und Untersuchungen hinsichtlich der Erosions-, Wasserlagerungs- und Trocken-Naß-Wechselbeständigkeit durchgeführt (vgl. Abschnitt 7). Die zusätzlichen Untersuchungen erfolgten 28 Tage nach der Prüfkörperherstellung; die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen in der Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 3 und 4 zusammengefaßt.

Die Proctordichte der Mischung M6 betrug  $\rho_{Pr} = 1.954 \text{ t/m}^3$  und der zugehörige Proctorwassergehalt  $w_{Pr} = 12.3 \%$  (vgl. Proctorkurve auf Bild 5).

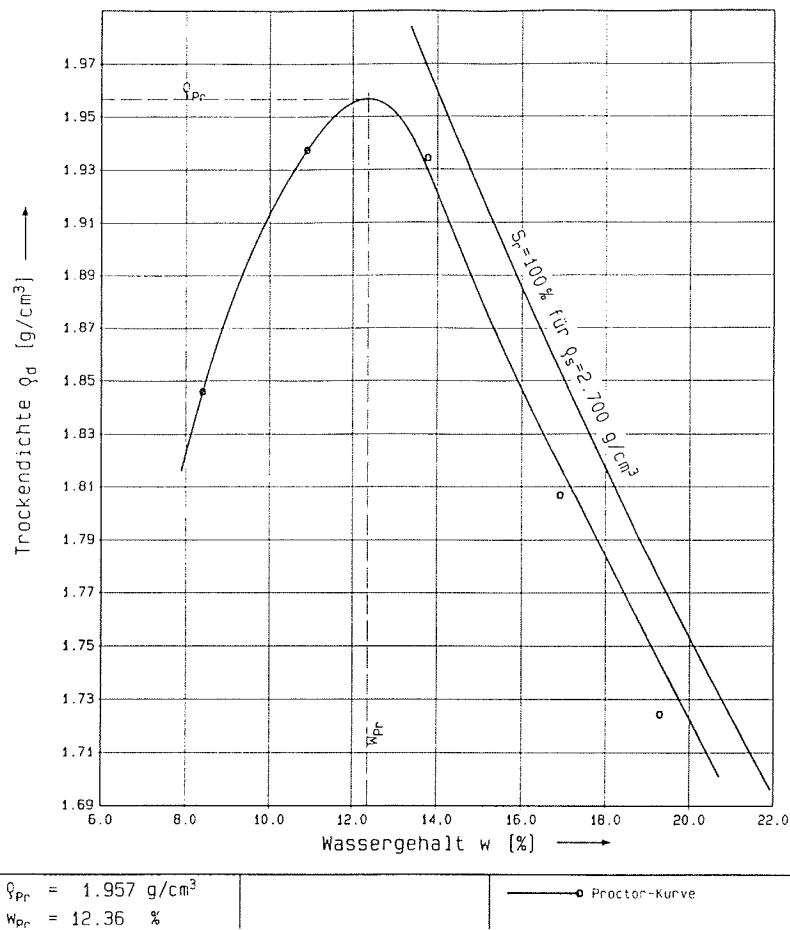


Bild 5: Proctorkurve der Mischung M6

Die Mischung war bis zu einem Wassergehalt von ca.  $w = 15\%$ , d.h. ca.  $w = w_{Pr} + 3\%$  gut verarbeitbar. Erst bei Einbauwassergehalten über  $15\%$  wurde eine Klumpenbildung sowie eine zunehmend schlechtere Verdichtbarkeit festgestellt, was an dem starken Abfall der Trockendichte  $\rho_d$  der Prüfkörper erkennbar ist (vgl. Tabelle auf Anlage 1 Blatt 3). Fotografien der losen Mischung bei unterschiedlichen Wassergehalten finden sich auf der Anlage 2 Blatt 1 und 2.

Die an den Prüfkörpern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen für Einbauwassergehalte über dem Proctorwassergehalt von  $w_{Pr} = 12.3\%$  stets bei ca.  $k < 1.0 \cdot 10^{-10}$  m/s und damit unter dem angestrebten Höchstwert von  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s. Die im Rahmen der einaxialen Druckversuche ermittelten Druckfestigkeiten  $q_u$  und E-Moduln von ausreichend undurchlässigen Prüfkörpern (Einbauwassergehalt  $w > 12\%$ ) lagen nach 28 Tagen im Bereich  $706 \leq q_u \leq 1216$  kN/m² und  $25 \leq E \leq 146$  MN/m².

Die an 28 Tage alten Prüfkörpern mit Einbauwassergehalten von  $w = 12, 15$  und  $18\%$  ermittelten Steifemoduln  $E_{s1}$  aus der Erstbelastungsphase des Kompressionsversuches (vgl. Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 4) lagen im Spannungsbereich zwischen  $\sigma = 50$  und  $1200 \text{ kN/m}^2$  zwischen  $71 \leq E_{s1} \leq 109 \text{ MN/m}^2$  ( $w = 12\%$ ),  $60 \leq E_{s1} \leq 125 \text{ MN/m}^2$  ( $w = 15\%$ ) und  $58 \leq E_{s1} \leq 71 \text{ MN/m}^2$  ( $w = 18\%$ ). Die Steifemoduln liegen demnach bei Einbauwassergehalten zwischen  $w = 12$  und  $18\%$  insgesamt in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus den drei Kompressionsversuchen sind - bedingt durch die unterschiedlichen Einbauwassergehalte bei konstanter Verdichtungsarbeit - insbesondere auf die unterschiedlichen Dichten der einzelnen Prüfkörper zu Versuchsbeginn zurückzuführen (vgl. Tabelle auf Anlage 1 Blatt 4). In dem nachfolgenden Bild 6 sind die spannungsabhängigen Steifemoduln der Mischung M6 zusammen mit den an Dränkiesproben der Körnung  $16/32 \text{ mm}$  bei lockerster und dichtester Lagerung ermittelten Steifemoduln (vgl. Abschnitt 4.3) aufgetragen. Die Steifigkeiten der Mischung M6 liegen demnach im Steifigkeitsbereich der locker bis etwa mitteldicht gelagerten Kiesschüttung.

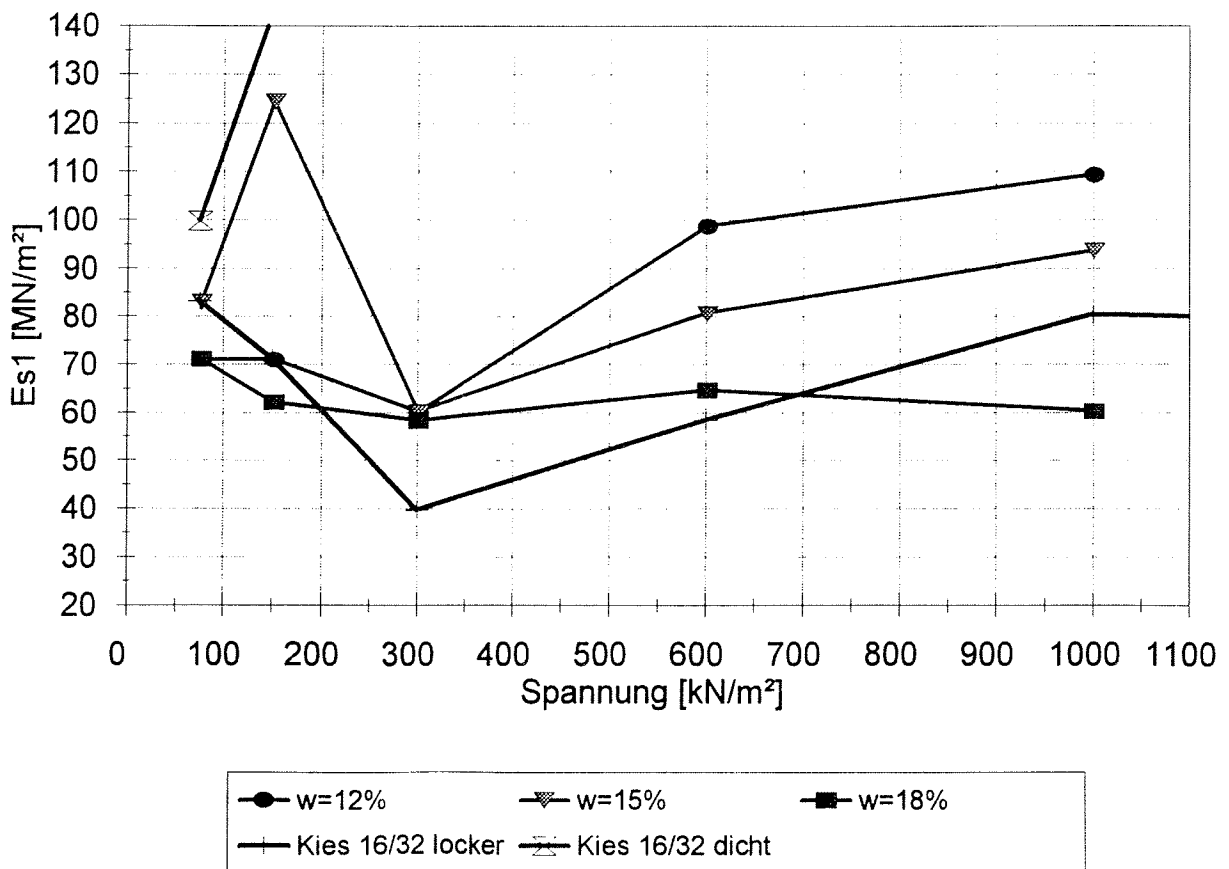


Bild 6: Mischung M6 - Steifemoduln  $E_{s1}$  aus der Erstbelastung des Kompressionsversuchs für verschiedene Einbauwassergehalte (Probenalter 28 Tage) im Vergleich zu entsprechenden Steifemoduln von Dränkies der Körnung  $16/32 \text{ mm}$

Zwei Serien von jeweils 3 Prüfkörpern mit 12, 15 und 18 % Einbauwassergehalt wurden nach 7 und 28 Tagen Feuchtlagerung anschließend 7 Tage lang unter Wasser gelagert (vgl. Abschnitt 7.8) und hierbei hinsichtlich eventueller Aufweichungen untersucht. Augenscheinlich konnten an den Prüfkörpern keine Aufweichungen festgestellt werden. Doch ergaben die abschließend durchgeführten einaxialen Druckfestigkeitsuntersuchungen für die beiden auf der trockenen Seite der Proctorkurve hergestellten Probekörper mit Einbauwassergehalten um 12 % ( $q_u = 137 \text{ kN/m}^2$  und  $457 \text{ kN/m}^2$ ) deutlich geringere Druckfestigkeiten als bei nicht wassergelagerten Prüfkörpern mit gleichem Einbauwassergehalt ( $q_u = 1356 \text{ kN/m}^2$  und  $1123 \text{ kN/m}^2$ ). Dieser Effekt wurde bei höheren Einbauwassergehalten von  $w = 15$  und  $18$  % nicht beobachtet. Die einaxialen Druckfestigkeiten dieser Prüfkörper lagen nach der Wasserlagerung mit nur geringen Einbußen in vergleichbarer Größenordnung als die der nicht wassergelagerten Prüfkörper bei ca.  $q_u = 409$  bis  $1216 \text{ kN/m}^2$  (vgl. Anlage 1 Blatt 3). Vergleichbare Beobachtungen konnten auch bei anderen Mischungen gemacht werden, wonach bei auf der trockenen Seite der Proctorkurve verdichteten Mischungen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Wasserzutritt oder Trocken-Naß-Wechseln gegeben war.

Die Untersuchungen hinsichtlich der Erosionsstabilität (vgl. Abschnitt 7.9) wurden an 28 Tage alten Prüfkörper mit Einbauwassergehalten von 12, 15 und 18 % durchgeführt und wiesen die Mischung M6 als erosionsstabil aus. Es konnten nach insgesamt 10-tägiger Versuchsdauer und maximal 10 m WS (1 bar) Differenzdruck nur geringste Erosionserscheinungen im Einströmbereich festgestellt werden (vgl. Anlage 3 Blatt 1 und 2).

Bei der Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung wurden an Prüfkörpern mit 12, 15 und 18 % Einbauwassergehalt unterschiedlich starke Zerfallerscheinungen beobachtet. Die Prüfkörper mit 15 und 18 % Einbauwassergehalt wiesen einen deutlichen Oberflächenzerfall auf, überstanden jedoch insgesamt 10 Trocken-Naß-Wechsel ohne inneren Festigkeitsverlust, was die abschließenden einaxialen Druckprüfungen nach der 10. Versuchsperiode mit Druckfestigkeiten von  $q_u = 1873$  und  $3049 \text{ kN/m}^2$  belegen.

Der Prüfkörper mit 12 % Einbauwassergehalt hingegen war nach dem 3. Trocken-Naß-Wechselversuch bereits so stark zerfallen, daß eine einaxiale Druckprüfung nicht mehr möglich war. Bilder der Prüfkörper am Ende der Trocken-Naß-Wechselversuche finden sich auf der Anlage 4 Blatt 1 und 2.

Die abschließend an 3 jeweils 28 Tage alten Prüfkörpern mit Einbauwassergehalten von  $w = 12$  und  $15$  % durchgeführten Triaxialversuche (vgl. Abschnitt 7.4) wurden als Mehrstufenversuche bei jeweils unterschiedlicher primärer effektiven Seitendruckspannung  $\sigma_{3-1}'$  durchgeführt (vgl. Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 4, Spalte 3). Die Auswertung der einzelnen Mehrstufenversuche ergab für  $w = 12$  % effektive Winkel der inneren Reibung von  $\varphi' = 25.1^\circ$  bis  $33.6^\circ$  und effektive Kohäsionswerte von  $c' = 156$  kN/m<sup>2</sup> bis  $150$  kN/m<sup>2</sup> sowie für  $w = 15$  % effektive Winkel der inneren Reibung von  $\varphi' = 33.8^\circ$  bis  $40.9^\circ$  und effektive Kohäsionswerte von  $c' = 238$  kN/m<sup>2</sup> bis  $149$  kN/m<sup>2</sup>.

Eine unabhängige Auswertung der Versuchsergebnisse von drei unterschiedlichen Prüfkörpern mit jeweils gleichem Einbauwassergehalt und unterschiedlicher effektiver Anfangsseitenspannung  $\sigma'_{3-1}$  (vgl. die Angaben für die Hauptspannungen im Bruchzustand; Spalte 6 und 7 der Tabelle auf Anlage 1 Blatt 4) ergab die folgenden Werte:

Einbauwassergehalt $w$ [%]	Winkel der inneren Reibung $\varphi'$ [°]	Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
ca. 12	ca. 12	ca. 270
ca. 15	ca. 42	ca. 135

Das Auswertungsergebnis für die Prüfkörper mit  $w = 12$  % Einbauwassergehalt weicht sowohl von Erfahrungswerten mit vergleichbaren ungebundenen Bodenmaterialien als auch von den übrigen Versuchswerten sehr stark ab und ist deshalb anzuzweifeln.

Die sehr unterschiedlichen Ergebnisse können keinen systematischen Besonderheiten zugeordnet werden. Es ist vielmehr davon auszugehen, daß diese Unterschiede in den Differenzen der Anfangsdichten und der Verfestigungsgrade der Prüfkörper begründet sind. Um die Gründe für die starke Streuung der Versuchsergebnisse näher zu untersuchen, wären eingehendere Untersuchungen erforderlich, die sich ausschließlich mit dem Scherfestigkeitsverhalten dieser Mischungszusammensetzung beschäftigen.

## 8.7 Mischung M7

Die Mischung M7 unterscheidet sich von Mischung M6 nur durch die Art des Bindemittels (70 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 20 % Tonmehl (Kaolinit), 7 % Ca-Bentonit und 3 % Spezialbindemittel). Es wurde das Spezialbindemittel Aquament von der Firma Heidelberger Zement verwendet.

Mit Ausnahme von Triaxialversuchen wurde an der Mischung M7 das gleiche Versuchsprogramm wie bei Mischung M6 durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen auf der Anlage 1 Blatt 5 tabellarisch zusammengestellt.

Die Proctorwerte der Mischung M7 waren mit denen der Mischung M6 nahezu identisch und betragen  $\rho_{Pr} = 1.951 \text{ t/m}^3$  und  $w_{Pr} = 11.7 \%$ , so daß auch die Verarbeitbarkeit der Mischung M7 vergleichbar beurteilt wurde.

In bezug auf die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte, die Größenordnung der Steifigkeiten bei den Kompressionsversuchen und die Beständigkeit bei den Erosionsversuchen waren die Versuchsergebnisse etwa vergleichbar mit den Ergebnissen aus Untersuchungen an der Mischung M6. Lediglich die Steifemoduln für den bei  $w = 12 \%$  Wassergehalt hergestellten Prüfkörper sind mit  $55 \leq E_{s1} \leq 213 \text{ MN/m}^2$  außergewöhnlich hoch ausgefallen. In dem nachfolgenden Bild 7 sind die spannungsabhängigen Steifemoduln der Mischung M7 zusammen mit den an Dränkiesproben der Körnung 16/32 mm bei lockerster und dichtester Lagerung ermittelten Steifemoduln (vgl. Abschnitt 4.3) aufgetragen. Die Steifigkeiten der Mischung M7 liegen etwa im Steifigkeitsbereich der locker bis etwa mitteldicht gelagerten Kiesschüttung.

Systematische Unterschiede haben sich bei den einaxialen Druckfestigkeitsuntersuchungen ergeben. Sowohl die einaxialen Druckfestigkeiten als auch die ermittelten E-Moduln der Mischung M7 fielen tendenziell geringer aus. Auf Bild 8 sind exemplarisch die einaxialen Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Mischungen M6 und M7 in Abhängigkeit von der Trockendichte der Prüfkörper für verschiedene Prüfkörperalter dargestellt.

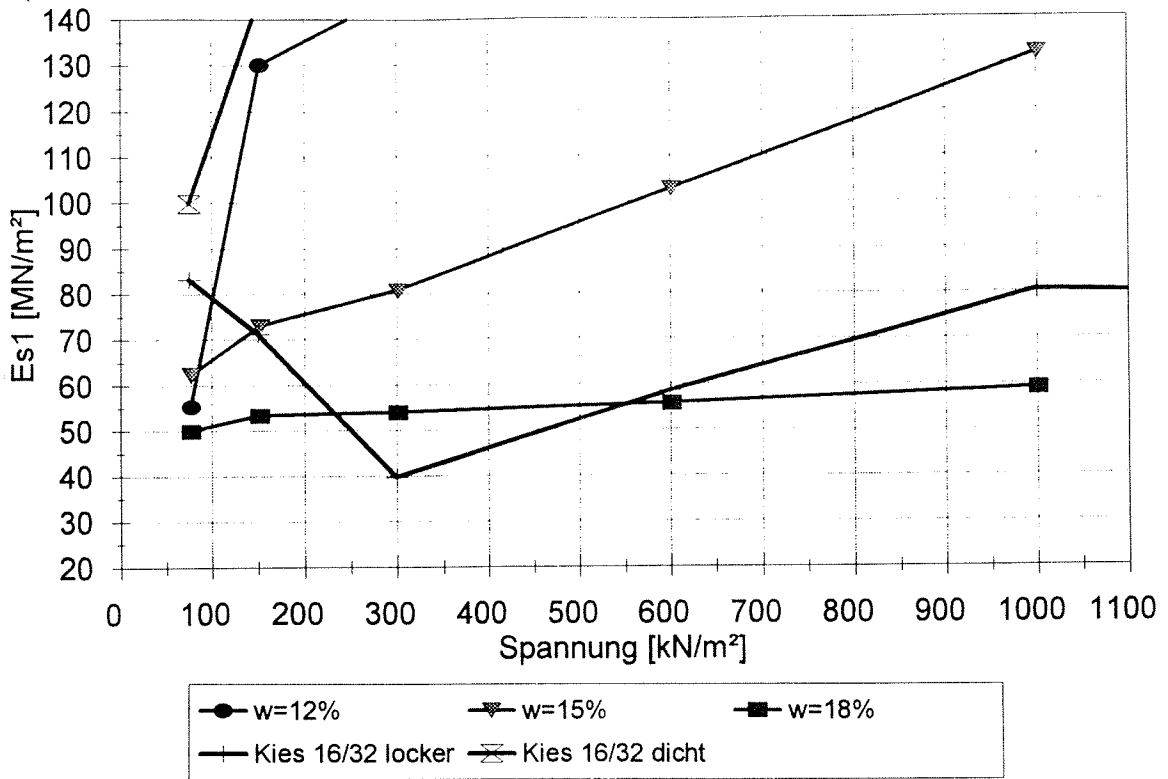


Bild 7: Mischung M7 - Steifemodul  $E_{s1}$  aus der Erstbelastung des Kompressionsversuchs für verschiedene Einbauwassergehalte (Probenalter 28 Tage) im Vergleich zu entsprechenden Steifemoduln von Dränkies der Körnung 16/32 mm

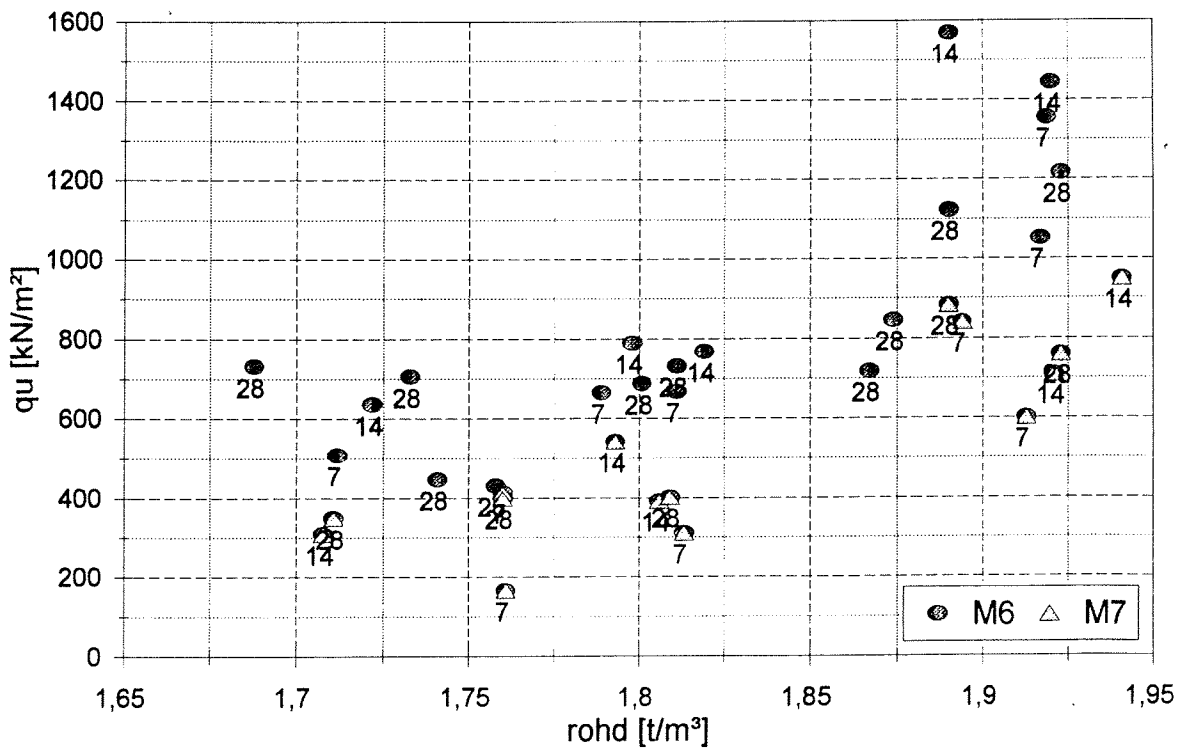


Bild 8 : Einaxiale Druckfestigkeiten  $q_u$  der Mischungen M6 und M7 in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_d$  der Prüfkörper mit Angabe des Prüfkörperalters



Bei der 7-tägigen Wasserlagerung (vgl. Abschnitt 7.8) zeigten die Prüfkörper der Mischung M7 mit ca. 12, 15 und 18 % Einbauwassergehalt sowohl augenscheinlich als auch bei der abschließenden einaxialen Druckprüfung stärkere Aufweichungen bzw. Festigkeitseinbußen, als dies bei Prüfkörpern der Mischung M6 festgestellt wurde. Während die einaxialen Druckfestigkeiten der feucht gelagerten 28 Tage alten Prüfkörper mit vergleichbaren Einbauwassergehalten mit  $q_u = 402$  bis  $884 \text{ kN/m}^2$  ermittelt wurden, konnten an den wassergelagerten Prüfkörpern nur noch Druckfestigkeiten von  $q_u = 282$  bis  $456 \text{ kN/m}^2$  ermittelt werden.

Bei der Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung wurden an Prüfkörpern mit 12, 15 und 18 % Einbauwassergehalt unterschiedlich starke Zerfallserscheinungen beobachtet. Die Prüfkörper mit 15 und 18 % Einbauwassergehalt wiesen einen deutlichen Oberflächenzerfall auf, der deutlich stärker war als der bei den Prüfkörpern der Mischung M6, überstanden jedoch insgesamt 10 Trocken-Naß-Wechsel und konnten abschließend zu einer einaxialen Druckprüfung verwendet werden. Die Druckfestigkeiten betragen  $q_u = 1886$  und  $1057 \text{ kN/m}^2$ .

Der Prüfkörper mit 12 % Einbauwassergehalt zerfiel vollständig. Eine Fotografie dieses Prüfkörpers nach der 2. Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung befindet sich auf der Anlage 4 Blatt 2.

Aufgrund der größeren Empfindlichkeit bei Wasserlagerung und bei den Trocken-Naß-Wechselversuchen wurde die Mischung M7 nicht weiter untersucht.

## 8.8 Mischung M8

Für die Mischung M8 wurde anstelle des Spezialbindemittels mit dem Produktnamen Aquament das Produkt Protomix C, ebenfalls von der Firma Heidelberger Zement verwendet. Die Mischung M8 bestand somit aus 70 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 20 % Tonmehl (Kaolinit), 7 % Ca-Bentonit und 3 % Spezialbindemittel Protomix C.

Es wurden an der Mischung M8 mit Ausnahme von Kompressionsversuchen die gleichen Untersuchungen wie bei Mischung M7 durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen auf der Anlage 1 Blatt 6 tabellarisch zusammengestellt.

Die Proctorwerte der Mischung M8 lagen bei  $\rho_{Pr} = 2.032 \text{ t/m}^3$  und  $w_{Pr} = 10.8 \%$ . Bei den Untersuchungen an der Mischung M8 haben sich deutliche Unterschiede zu den Untersuchungsergebnissen der Mischungen M6 und M7 ergeben. Die auffälligsten Unterschiede sind die unzureichende Beständigkeit bei Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung und bei Wasserlagerung. Die Prüfkörper der Mischung M8 zeigten nach 7-tägiger Wasserlagerung deutliche Aufweichungen und erreichten bei abschließenden einaxialen Druckfestigkeitsuntersuchungen nur noch Werte von  $q_u = 45$  bis  $268 \text{ kN/m}^2$  gegenüber  $q_u = 188$  bis  $891 \text{ kN/m}^2$  bei feucht gelagerten Prüfkörpern mit vergleichbarem Einbauwassergehalt. Bei der Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung zerfielen die Prüfkörper mit 12, 15 und 18 % Einbauwassergehalt bereits nach wenigen Trocken-Naß-Zyklen fast vollständig. Fotografien der Prüfkörper mit 12, 15 und 18 % Einbauwassergehalt sind auf der Anlage 4 Blatt 3 und 4 zusammengestellt. Mischung M8 wurde deshalb für weitere Untersuchungen ausgeschieden.

## 8.9 Mischung M9

Aufgrund der nur mäßigen Beständigkeit der Mischung M6 gegenüber Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung, die dem stark quellfähigen Bentonit zuzuschreiben ist, wurde bei Mischung M9 auf die Zugabe von Bentonit verzichtet und ein entsprechend höherer Anteil an Kaolin-Tonmehl verwendet. Die Mischung M9 bestand aus 70 % Sand der Körnung 0/4a mm nach DIN 4226, 27 % Tonmehl (Kaolinit) und 3 % Zement HOZ 35 L. Die Korngrößenverteilung der Mischung M9 ist in Bild 9 dargestellt. Sie unterscheidet sich kaum von der Körnungslinie der Mischung M6.

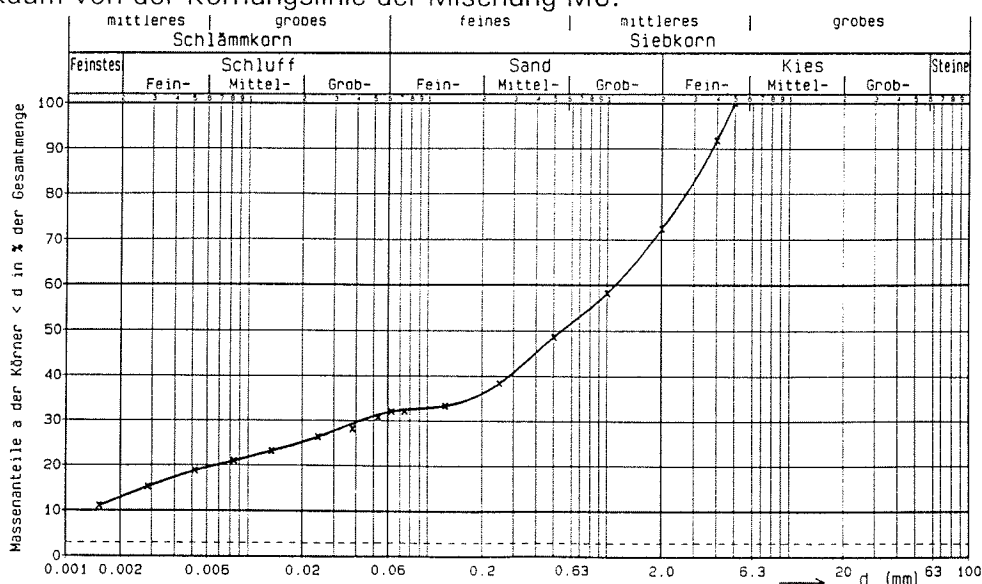


Bild 9: Korngrößenverteilung der Mischung M9

Auch an der Mischung M9 wurden neben einaxialen Druckversuchen und Durchlässigkeitsversuchen zusätzlich Kompressionsversuche, Triaxialversuche und Untersuchungen hinsichtlich der Erosions-, Wasserlagerungs- und Trocken-Naß-Wechselbeständigkeit durchgeführt (vgl. Abschnitt 7). Die zusätzlichen Untersuchungen erfolgten 28 Tage nach der Prüfkörperherstellung; die Untersuchungsergebnisse sind im einzelnen in der Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 7 und 8 zusammengefaßt. Die Proctordichte der Mischung M9 betrug  $\rho_{Pr} = 2.001 \text{ t/m}^3$  und der zugehörige Proctorwassergehalt  $w_{Pr} = 11.2 \%$  (vgl. Proctorkurve in Bild 10).

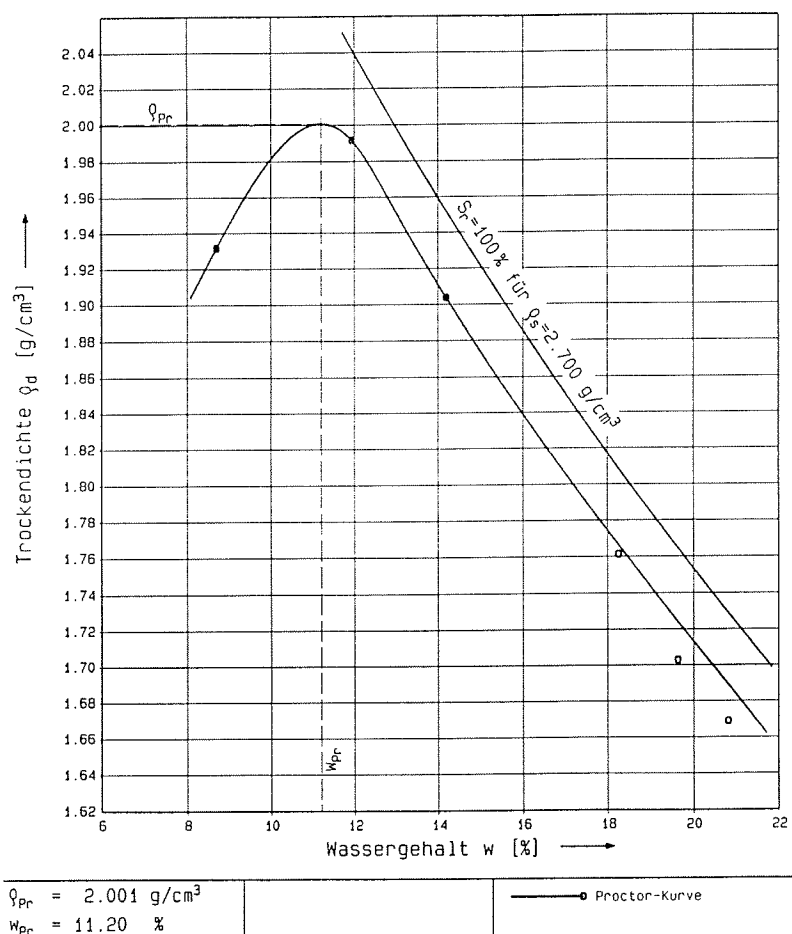


Bild 10: Proctorkurve der Mischung M9

Die Mischung war bis zu einem Wassergehalt von ca.  $w = 14 \%$ , d.h. ca.  $w = w_{Pr} + 3 \%$  gut verarbeitbar. Erst bei Einbauwassergehalten über  $14 \%$  wurde eine Klumpenbildung sowie eine zunehmend schlechtere Verdichtbarkeit festgestellt, was an dem starken Abfall der Trockendichte  $\rho_d$  der Prüfkörper erkennbar ist (vgl. Tabelle auf Anlage 1 Blatt 7). Fotografien der losen Mischung bei unterschiedlichen Wassergehalten finden sich auf der Anlage 2 Blatt 3 und 4.

Die an den Prüfkörpern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen für Einbauwassergehalte über dem Proctorwassergehalt von  $w_{pr} = 11.2\%$  stets bei ca.  $k < 5.2 \cdot 10^{-10}$  m/s und damit unter dem angestrebten Höchstwert von  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s. Die im Rahmen der einaxialen Druckversuche ermittelten Druckfestigkeiten  $q_u$  und E-Moduln von ausreichend undurchlässigen Prüfkörpern (Einbauwassergehalt  $w > 12\%$ ) lagen nach 28 Tagen im Bereich  $338 \leq q_u \leq 1493$  kN/m<sup>2</sup> und  $23 \leq E \leq 233$  MN/m<sup>2</sup>.

Die an jeweils 2 Prüfkörpern mit Einbauwassergehalten von  $w = 12, 15$  und  $18\%$  ermittelten Steifemoduln  $E_{s1}$  aus der Erstbelastungsphase des Kompressionsversuches (vgl. Anlage 1 Blatt 8) lagen im Spannungsbereich zwischen  $\sigma = 50$  und  $1200$  kN/m<sup>2</sup> zwischen  $26 \leq E_{s1} \leq 154$  MN/m<sup>2</sup> ( $w = 12\%$ ),  $15 \leq E_{s1} \leq 121$  MN/m<sup>2</sup> ( $w = 15\%$ ) und  $28 \leq E_{s1} \leq 90$  MN/m<sup>2</sup> ( $w = 18\%$ ). Die Steifemoduln liegen demnach bei Einbauwassergehalten zwischen  $w = 12$  und  $18\%$  insgesamt in einer etwa vergleichbaren Größenordnung. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus den drei Kompressionsversuchen sind - bedingt durch die unterschiedlichen Einbauwassergehalte bei konstanter Verdichtungsarbeit - insbesondere auf die unterschiedlichen Dichten der einzelnen Prüfkörper zu Versuchsbeginn zurückzuführen (vgl. Tabelle auf Anlage 1 Blatt 8). In dem nachfolgenden Bild 11 sind die spannungsabhängigen Steifemoduln der insgesamt 6 untersuchten Prüfkörper der Mischung M9 mit Einbauwassergehalten von  $w = 12, 15$  und  $18\%$  zusammen mit den an Dränkiesproben der Körnung 16/32 mm bei lockerster und dichtester Lagerung ermittelten Steifemoduln (vgl. Abschnitt 4.3) aufgetragen. Die Steifigkeiten der Mischung M9 liegen demnach im Steifigkeitsbereich der locker bis etwa mitteldicht gelagerten Kiesschüttung.

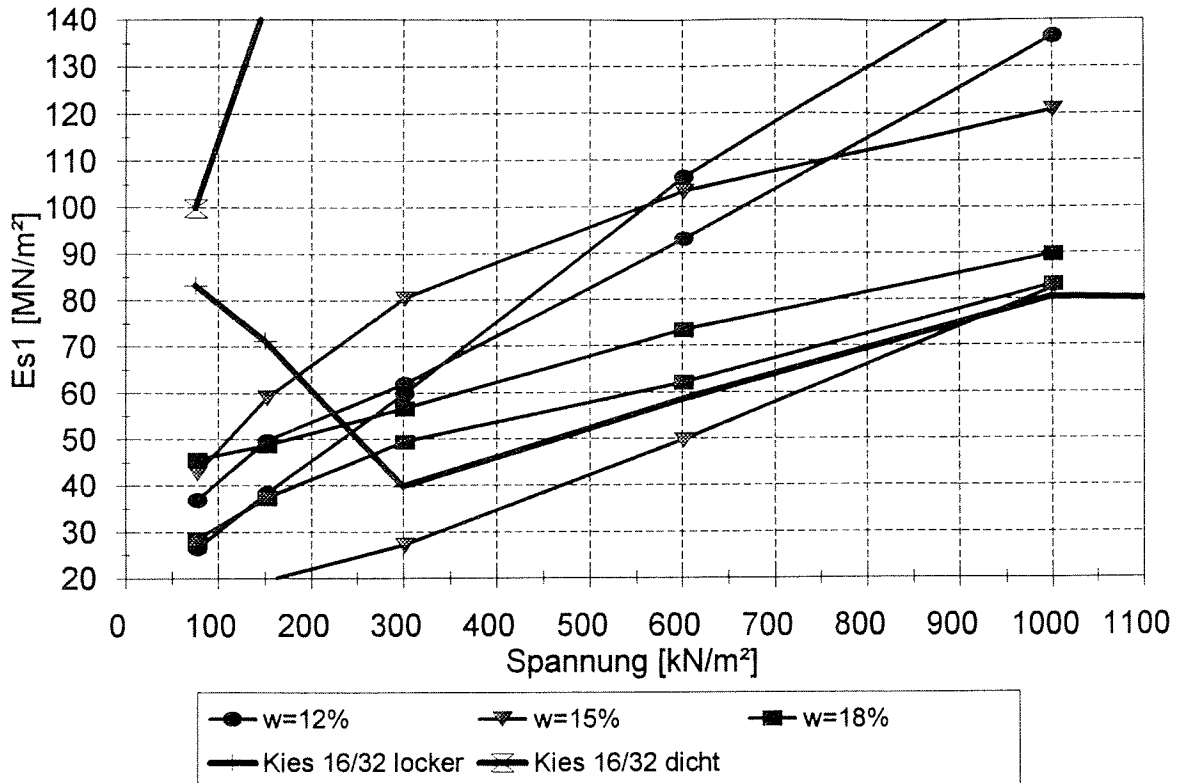


Bild 11: Mischung M9 - Steifemoduln  $E_{s1}$  aus der Erstbelastung des Kompressionsversuchs für verschiedene Einbauwassergehalte (Probenalter 28 Tage) im Vergleich zu entsprechenden Steifemoduln von Dränkies der Körnung 16/32 mm

Untersuchungen hinsichtlich der Erosionsstabilität wurden an 28 Tage alten Prüfkörpern mit Einbauwassergehalten von 12, 15 und 18 % durchgeführt und wiesen die Mischung M9 als erosionsstabil aus. Es konnten - vergleichbar mit Mischung M6 - nach insgesamt 10-tägiger Versuchsdauer und maximal 10 m WS (1 bar) Differenzdruck nur geringste Erosionserscheinungen im Einströmbereich festgestellt werden.

Bei der Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung wurde an Prüfkörpern mit 12, 15 und 18 % Einbauwassergehalt nur ein oberflächiges Absanden beobachtet. Die abschließenden einaxialen Druckprüfungen nach der 10. Versuchsperiode ergaben Druckfestigkeiten von  $q_u = 453$  bis  $1834 \text{ kN/m}^2$ , und damit im Vergleich zu den Festigkeiten von feucht gelagerten Prüfkörpern mit vergleichbaren Wassergehalten mindestens gleich große Werte.

Fotografien der Prüfkörper am Ende der Trocken-Naß-Wechselversuche (10 Zyklen) finden sich auf der Anlage 4 Blatt 4 und 5.

Die an 9 jeweils 28 Tage alten Prüfkörpern mit Einbauwassergehalten von  $w = 12 \%$ ,  $15 \%$ , und  $18 \%$  durchgeführten Triaxialversuche (vgl. Abschnitt 7.4) wurden als

Mehrstufenversuche bei jeweils unterschiedlicher primärer effektiven Seitendruckspannung  $\sigma_{3,1}'$  durchgeführt (vgl. Tabelle auf der Anlage 1 Blatt 8, Spalte 3). Die Auswertung der einzelnen Mehrstufenversuche ergab die folgenden Winkel der inneren Reibung  $\varphi'$  und Kohäsionswerte  $c'$ .

Einbauwassergehalt w [%]	Winkel der inneren Reibung $\varphi'$ [°]	Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
ca. 12	ca. 32 bis 33	ca. 220 bis 260
ca. 15	ca. 36 bis 45	ca. 65 bis 102
ca. 18	ca. 39 bis 44	ca. 95 bis 128

Eine unabhängige Auswertung der Versuchsergebnisse von drei unterschiedlichen Prüfkörpern mit jeweils gleichem Einbauwassergehalt und unterschiedlicher effektiver Anfangsseitenspannung  $\sigma'_{3,1}$  (vgl. die Angaben für die Hauptspannungen im Bruchzustand; Spalte 6 und 7 der Tabelle auf Anlage 1 Blatt 8) ergab die folgenden Scherfestigkeitswerte:

Einbauwassergehalt w [%]	Winkel der inneren Reibung $\varphi'$ [°]	Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
ca. 12	ca. 44	ca. 160
ca. 15	ca. 39	ca. 90
ca. 18	ca. 37	ca. 135

Die zwei vorbeschriebenen Arten der Versuchsauswertung führen zu unterschiedlichen Ergebnissen, was keinen systematischen Besonderheiten zugeordnet werden kann. Es ist vielmehr davon auszugehen, daß diese Unterschiede in den unterschiedlichen Anfangsdichten und Verfestigungsgraden der Prüfkörper zu suchen sind. Um die Gründe für die starke Streuung der Versuchsergebnisse näher zu untersuchen, wären eingehendere Untersuchungen erforderlich, die sich ausschließlich mit dem Scherfestigkeitsverhalten dieser Mischungszusammensetzung beschäftigen. Es ist hierbei zu überdenken, ob der Triaxialversuch nach der Mehrstufentechnik zur Bestimmung von verfestigten Bodengemischen die geeignete Versuchsdurchführung darstellt.

## 9 VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 9.1 Allgemeines

Im folgenden werden die in den Abschnitten 8.1 bis 8.9 beschriebenen Untersuchungsergebnisse aus Versuchen an den Mischungen M1 bis M9 zusammenfassend dargestellt und abschließend untereinander verglichen. Erkenntnisse und Schlußfolgerungen, die sich aus den Untersuchungsergebnissen ableiten lassen, werden hierbei zusammenfassend beschrieben und gewertet sowie die Einflüsse der einzelnen Mischungskomponenten auf die Eigenschaften der Rohrauflagermischung erläutert und anhand der Untersuchungsergebnisse belegt.

### 9.2 Einbauwassergehalt

Wie auch bei ungebundenen Bodenmaterialien ist insbesondere für hydraulisch gebundene Mischungen der Einbauwassergehalt für die bei der Prüfkörperherstellung erreichte Materialverdichtung sowie für die mechanischen Eigenschaften und für die Durchlässigkeit der Mischungen M1 bis M9 entscheidend. Die Bilder 12 bis 14 zeigen für die Mischungen M1 bis M9 zusammenfassend die Abhängigkeit der Durchlässigkeiten, der Steifigkeiten und der Festigkeiten von den Einbauwassergehalten für konstante Verdichtungsarbeit bei der Prüfkörperherstellung. Die Proctorwassergehalte der Mischungen M1 bis M9 liegen etwa zwischen  $w = 10.5$  und  $12.5$  %; der entsprechende Bereich ist in den Bildern gekennzeichnet.

Mit zunehmendem Einbauwassergehalt sinkt die Durchlässigkeit der verdichteten Mischungen, erreicht bei einem Wassergehalt, der in der Regel ca. 2 bis 3 % über dem optimalen Wassergehalt des Proctorversuchs liegt, ein Minimum und steigt mit weiter zunehmendem Einbauwassergehalt, wahrscheinlich infolge der immer schlechteren Verdichtbarkeit der Mischungen, wieder an (vgl. Bild 12). Hierbei scheinen Mischungen mit nur geringem Anteil an quellfähigen Tonen, d.h. ohne Bentonit (M3 und M9; dicke Linien) vom Einbauwassergehalt weniger stark beeinflusst zu werden als Mischungen mit Bentonit, wobei mit allen Mischungen bei Einbauwassergehalten von  $w = w_{pr} + 2$  bis 3 % Durchlässigkeitsbeiwerte von  $k < 1 \cdot 10^{-9}$  m/s erreicht wurden. Die Ablehnung einer Mischung war durchweg in ungenügenden Steifigkeits- bzw. Festigkeitseigenschaften

Die Festigkeitsverlusten bei Wasserlagerung oder Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung begründet.

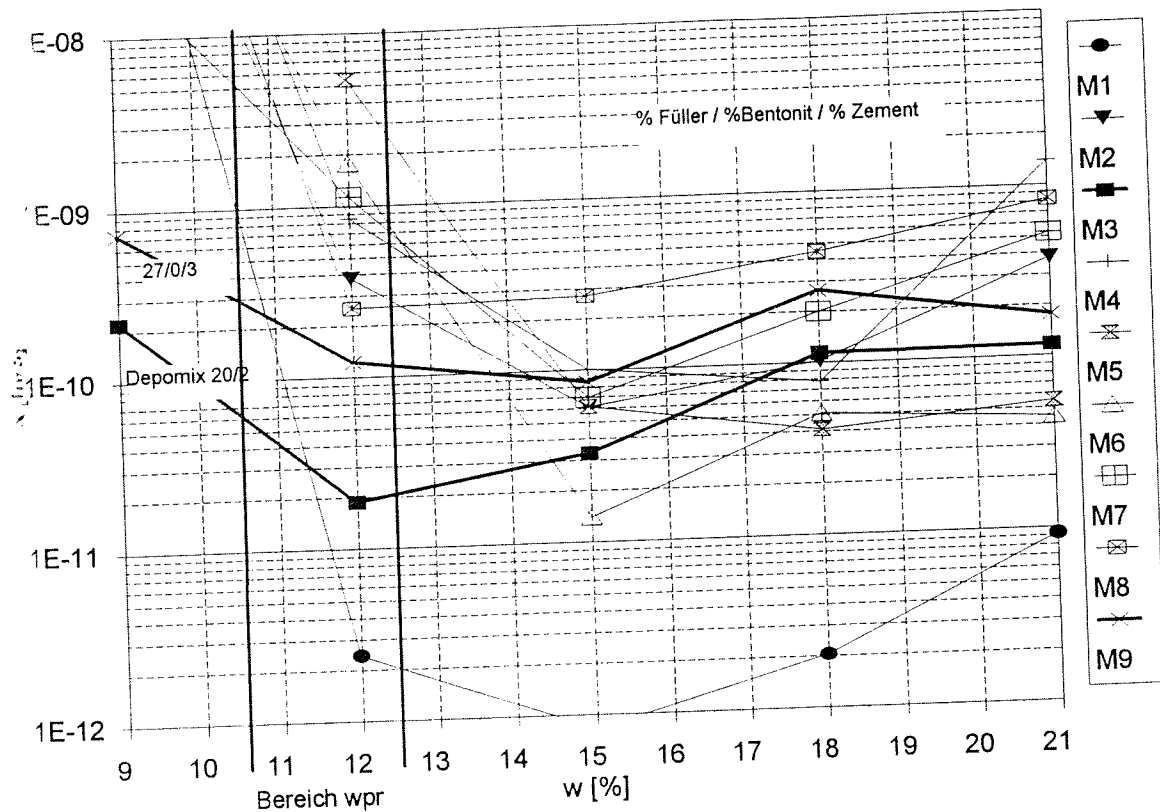


Bild 12: Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt  $w$  der Mischungen M1 bis M9, Probenalter 14 Tage

Die Steifigkeit und die Festigkeit der Mischungen M1 bis M9 sind bei Einbauwassergehalten um den Wassergehalt des Proctoroptimums aufgrund der dort bei konstanter Verdichtungsarbeit erreichten höchsten Materialdichten am größten (vgl. Bild 13). Mit geringeren und insbesondere bei höheren Einbauwassergehalten nimmt die Steifigkeit und die Festigkeit der Mischungen in der Regel stark ab (vgl. Bilder 13 und 14). Hierbei sind für die untersuchten Mischungen die größten Veränderungen im Wassergehaltsbereich zwischen Proctoroptimum und ca.  $w = 15$  % gegeben.



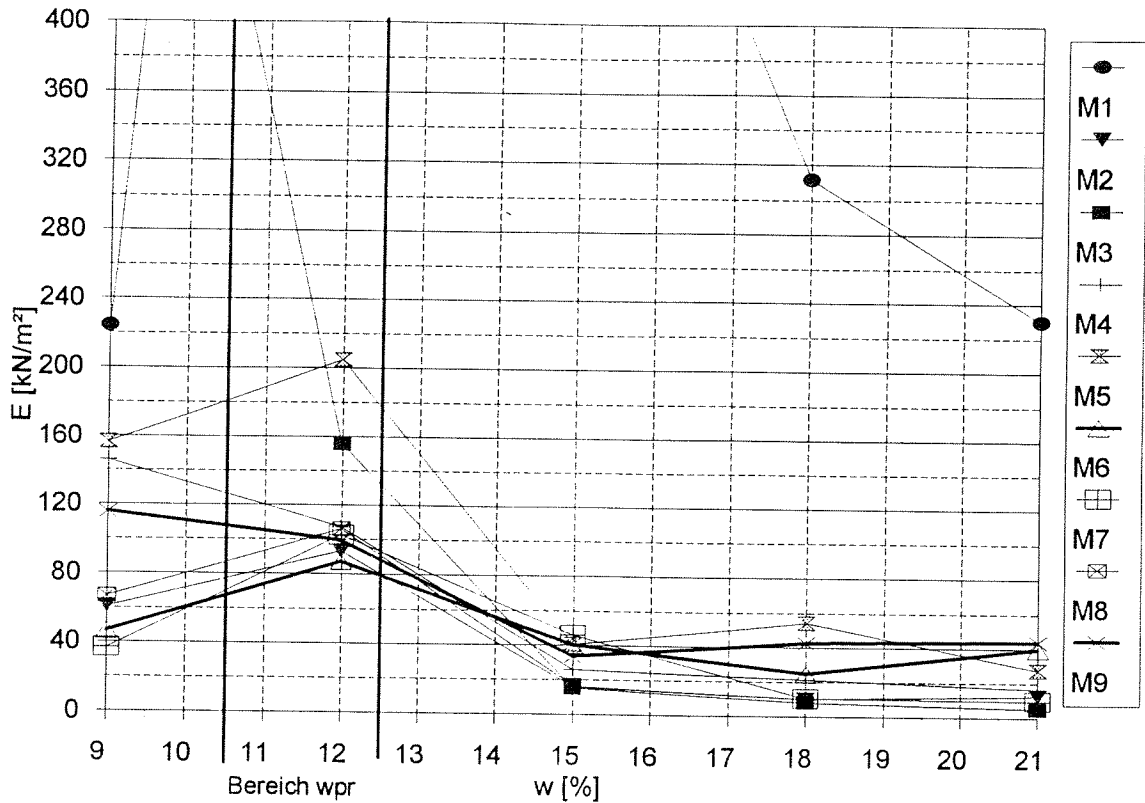


Bild 13: Mittlerer Elastizitätsmodul E aus einaxialem Druckversuch im Spannungsbereich 200 bis 600 kN/m<sup>2</sup> in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt w, Probenalter 14 Tage bzw. 28 Tage bei M6 bis M9; (M6 und M9 sind durch dicke Linien hervorgehoben)

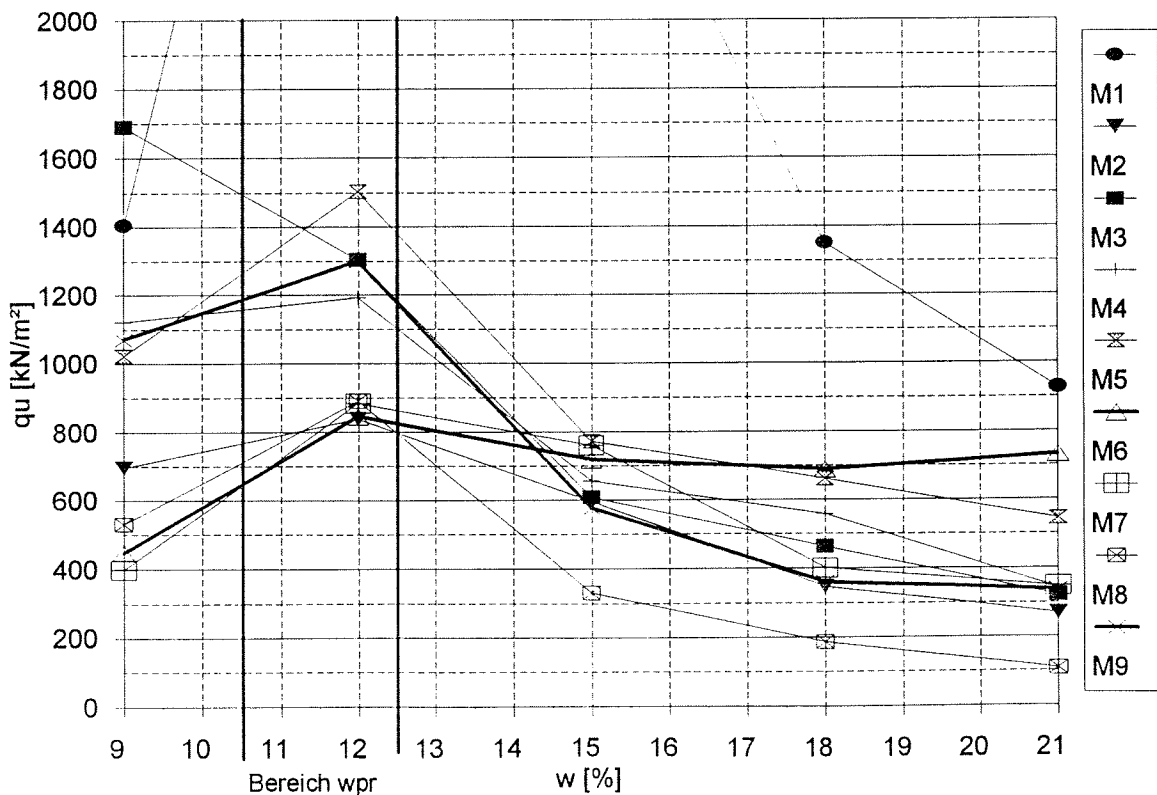


Bild 14: Einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt w, Probenalter 14 Tage bzw. 28 Tage bei M6 bis M9; (M6 und M9 sind durch dicke Linien hervorgehoben)

### 9.3 Porenfüller (Steinmehl, Tonmehl)

Der Vergleich mit im Rahmen von [5] untersuchten Mischungen, bei denen als Füller überwiegend Steinmehl und zur Verbesserung der Dichtwirkung Bentonit zugegeben wurde, zeigte, daß diese bei sonst ähnlicher Zusammensetzung abhängig vom jeweiligen Einbauwassergehalt im allgemeinen etwas höhere Steifigkeiten und Festigkeiten erreichen als Mischungen, deren Fülleranteil aus Tonmehl besteht. Neben einer größeren Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen im Einbauwassergehalt lassen sich mit Mischungen, bei denen als Füller Steinmehl verwendet wurde, in der Regel erst bei Einbauwassergehalten, die deutlich über dem Proctoroptimum liegen, Durchlässigkeitsbeiwerte kleiner  $10^{-8}$  m/s erreichen, was bei Verwendung von Tonmehl als Füllmaterial bereits beim Proctorwassergehalt erreicht werden kann (vgl. Bild 12).

Je nachdem, ob quellfähige Tone (z.B. Bentonite) oder nicht quellfähige Tone (z.B. Kaoline) eingesetzt werden, ändert sich das Verhalten der Mischungen hinsichtlich der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt. Wie aus Bild 12 ersichtlich, weisen die Mischungen M3 und M9 (ohne Bentonit) im Vergleich mit allen anderen untersuchten Mischungen (mit Bentonit) in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt die geringsten Veränderungen der Durchlässigkeit auf.

Bei Trocken-Naß-Wechseln zeigt sich die Mischung M9 (ohne Bentonit) deutlich widerstandsfähiger als die Mischung M6 (mit 7 % Bentonitanteil) (vgl. Bilder auf der Anlage 4 Blatt 1 und 2 bzw. 4 und 5). Beide Mischungen weisen sonst gleiche Anteile an Sand und Bindemittel auf.

Die Unterwasserlagerung wird bei ausreichendem Bindemittelanteil und ausreichender Erhärtung in der Regel von beiden Mischungszusammensetzungen gleichermaßen unbeschadet überstanden.

### 9.4 Bindemittel

Die Mischungen M6 und M9 mit Hochofenzement als Bindemittel zeigten insbesondere bei Naß-Trocken-Wechseln die größte Widerstandsfähigkeit. Als Beschädigung der Prüfkörper trat meist nur ein oberflächiges Abbröckeln und Absanden der äußersten Bereiche des Prüfkörpers auf, während Prüfkörper der Mischungen M7 und M8 mit Spezialbindemittel teilweise oder vollständig zerfielen.

Die Wahl des Bindemittels hat auch Einfluß auf die Beständigkeit der Rohrauflagermischung bei Wasserlagerung, wie die beobachteten Aufweichungen bei den mit Spezialbindemitteln hergestellten Mischungen M7 und M8 zeigen. Bei den mit Hochofenzement gebundenen Mischungen M6 und M9 waren hingegen keine nennenswerten Festigkeitseinbußen zu erkennen.

In bezug auf die Durchlässigkeit der Rohrauflagermischungen, denen als Füller Steinmehl zugegeben wurde, ist im Zusammenhang mit [5] beobachtet worden, daß bei sonst unveränderter Mischungszusammensetzung durch die Zugabe bzw. mit einem höheren Anteil an hydraulischem Bindemittel auch die Durchlässigkeit des Materials ansteigt, was bei den vergleichsweise hohen w/z-Werten und dem hierdurch entstehenden porösen Zementstein erklärbar ist.

## 10 ZUSAMMENFASSUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Auf der Grundlage der in den Abschnitten 8 und 9 beschriebenen Untersuchungsergebnisse, haben sich im Hinblick auf die in Abschnitt 2 angegebenen geforderten Eigenschaften für Rohrauflagermaterialien die folgenden 2 Mischungszusammensetzungen als günstig erwiesen:

### 1) Mischung 6 gemäß Tabelle 1

Proctordichte:	1,961	[t/m <sup>3</sup> ]
Proctorwassergehalt:	12,3	[%]
Gut abgestufter Sand mit geringem Feinanteil (Körnung 0/4a mm nach DIN 4226)	70	[%]
Tonmehl mit hohem Kaolinanteil	20	[%]
Natürlicher Ca-Bentonit	7	[%]
Hochofenzement HOZ 35 L	3	[%]

### 2) Mischung 9 gemäß Tabelle 1

Proctordichte:	2,001	[t/m <sup>3</sup> ]
Proctorwassergehalt:	11,2	[%]
Gut abgestufter Sand mit geringem Feinanteil (Körnung 0/4a mm nach DIN 4226)	70	[%]
Tonmehl mit hohem Kaolinanteil	27	[%]
Hochofenzement HOZ 35 L	3	[%]

Beide Mischungszusammensetzungen weisen bei Wassergehalten  $w_{pr} \leq w \leq w_{pr} + 3 \%$  und Verdichtungsgrade  $D_{pr} > 95 \%$  Durchlässigkeitsbeiwerte  $k < 5 \cdot 10^{-10}$  m/s auf, lassen sich bei Wassergehalten bis ca. 15 bzw. 14 % gut verarbeiten und ausreichend verdichten, erreichen bei zu empfehlenden Einbauwassergehalten zwischen 12 und 15 bzw. 14 % und Verdichtungsgraden  $D_{pr} > 95 \%$  einaxiale Druckfestigkeiten größer  $700 \text{ kN/m}^2$  (vgl. Bild 15) und Steifemoduln in einem Spannungsbereich zwischen 200 und  $800 \text{ kN/m}^2$  von ca.  $E_{s1} = 50$  bis  $110 \text{ MN/m}^2$  (vgl. Bilder 6 und 11).

In den Bildern 6 und 11 sind die spannungsabhängigen Steifemoduln, wie sie an Probekörpern aus beiden Mischungen für jeweils 12, 15 und 18% Einbauwassergehalt ermittelt wurden, zusammen mit den an Dränkiesproben der Körnung 16/32 mm bei lockerster und dichtester Lagerung ermittelten Steifemoduln aufgetragen. Für die Steifemoduln des Dränkieses haben sich in Versuchen zwischen der lockersten und der dichtesten Lagerung große Unterschiede ergeben, wobei jedoch davon ausgegangen werden kann, daß die Lagerungsdichte des Dränkieses beim Einbau in einer Deponie mehr einer lockeren bis mittleren Lagerung entspricht und die Steifemoduln der Rohrauflagermischungen M6 und M9 demnach in einem für die Rohrbeanspruchung günstigen Bereich liegen.

In bezug auf die Scherfestigkeitsparameter der erhärteten Mischungen M6 und M9 können aufgrund der stark streuenden Untersuchungsergebnisse aus den Triaxialversuchen als charakteristische Werte derzeit nur gemittelte Größen für  $\varphi'$  und  $c'$  angegeben werden, die sich für Mischung M6 zu ca.  $\text{char.}\varphi' = 34^\circ$  und  $\text{char.}c' = 160 \text{ kN/m}^2$  sowie für die Mischung M9 zu ca.  $\text{char.}\varphi' = 38^\circ$  und  $\text{char.}c' = 144 \text{ kN/m}^2$  ergeben haben. Sofern für Berechnungen Scherfestigkeitsbeiwerte benötigt werden, sollten Abminderungen vorgenommen werden. In den Empfehlungen der EAU [24] wird hierfür  $\tan \text{cal.}\varphi' = \tan \text{char.}\varphi' / 1.1$  und  $\text{cal.}c' = \text{char.}c' / 1.3$  angegeben. Folgt man dieser Empfehlung, ergeben sich für die Mischung M6  $\text{cal.}\varphi' = 31^\circ$  und  $\text{cal.}c' = 123 \text{ kN/m}^2$  sowie für die Mischung M9  $\text{cal.}\varphi' = 35^\circ$  und  $\text{cal.}c' = 110 \text{ kN/m}^2$ .

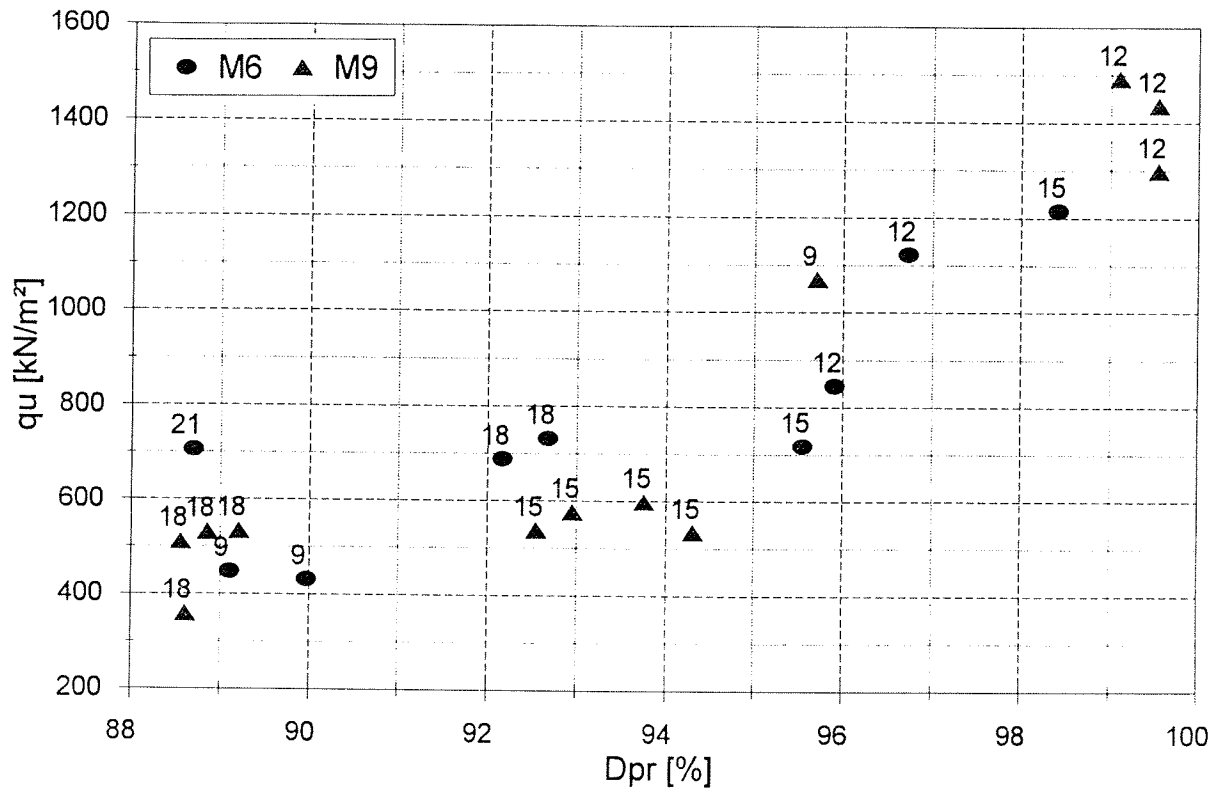


Bild 15: Zusammenhang zwischen Verdichtungsgrad und einaxialer Druckfestigkeit der Mischungen M6 und M9 mit Angabe der Einbauwassergehalte von  $w = 9$  bis  $21$  %

Beide Mischungen zeigten bei Wasserlagerung keine wesentliche Veränderung ihrer mechanischen Eigenschaften, widerstanden Naß-Trocken-Wechselbeanspruchungen weitgehend und waren auch bei hoher hydraulischer Beanspruchung erosionsstabil.

Von den genannten Mischungen wird die Mischung M9 bevorzugt, da ihre Durchlässigkeit geringere Schwankungen in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt aufweist (vgl. Bild 12) und bei Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung die geringsten Veränderungen an den Prüfkörpern beobachtet wurden (vgl. Anlage 4). Nicht zuletzt dürfte sie aufgrund der lediglich 3 Mischungskomponenten die wirtschaftlichere Lösung darstellen.

In wieweit diese Mischung bei größeren Belastungen und unterschiedlichen Verformungen rißempfindlich reagiert, müßte noch in einem großmaßstäblichen Versuch untersucht werden.

Hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und ihrer Durchlässigkeit liegen die Mischungen M4 und M5 ebenfalls in einem vergleichbaren Bereich. Sie unterscheiden sich in ihrer Mischungszusammensetzung nur geringfügig von Mischung M6 und wurden deshalb nicht so umfassend untersucht.

Die Mischungen M7 und M8 wurden wegen deutlichen Festigkeitsverlusten nach Wasserlagerung oder Naß-Trocken-Wechseln ausgeschieden. Die Mischung M1 wies zu hohe, die Mischung M2 hingegen zu geringe Steifigkeiten auf, so daß auch diese beiden Mischungszusammensetzungen nicht eingehender untersucht wurden. An den Prüfkörpern der Mischung M3 wurde im Bereich des Proctorwassergehalts eine unerwünscht starke Abhängigkeit der Steifigkeit vom Einbauwassergehalt ermittelt (vgl. Bild 13).

Um die Gründe für die starke Streuung der Versuchsergebnisse aus den Triaxialversuchen der Mischungen M6 und M9 näher zu untersuchen, wären eingehendere Untersuchungen erforderlich, die sich ausschließlich mit dem Scherfestigkeitsverhalten einer Mischungszusammensetzung beschäftigen.

## 11 HINWEISE FÜR DIE BAUÜBERWACHUNG UND BAUAUSFÜHRUNG

Auf der Grundlage der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens können als geeignete Mischungszusammensetzungen zur Auflagerung von Dränrohren in Deponiebasisabdichtungen die in Abschnitt 5.5 genannten Mischungen M6 und M9 empfohlen werden, die aus handelsüblichen Ausgangsmaterialien (Betonsand 0/4a nach DIN 4226, Kaolin-Tonmehl, Ca-Bentonit und Hochofenzement HOZ 35 L) zusammengesetzt wurden. Für diese Mischungen sind als günstige Einbauparameter im Hinblick auf die in Abschnitt 2 genannten Eigenschaften Einbauwassergehalte von  $w = 13$  bis  $15\%$  (M6) bzw.  $w = 12$  bis  $14\%$  (M9) und Verdichtungsgrade von  $D_{pr} \geq 95\%$  zu nennen. Aus Gründen der Gleichmäßigkeit der Rohraulagerung sollte beim Einbau ein möglichst einheitlicher Verdichtungsgrad erreicht werden.

Grundsätzlich sind auch andere gebundene Mischungszusammensetzungen denkbar, deren Ausgangsmaterialien den in Abschnitten 5.2 bis 5.4 genannten Anforderungen genügen. Für die gewählte Mischungszusammensetzung ist eine Eignungsprüfung mit den folgenden Untersuchungen durchzuführen:

- Sieb-Schämmanalyse nach DIN 18123; Ermittlung der Korngrößenzusammensetzung
- Proctorversuch nach DIN 18127; Ermittlung der Verdichtbarkeitseigenschaften
- Kompressionsversuch (vgl. Abschnitt 7.6); Prüfung der Steifigkeit
- Einaxialer Druckversuch (vgl. Abschnitt 7.3); Prüfung der Festigkeit
- Bestimmung der Durchlässigkeit (vgl. Abschnitt 7.5)
- Materialverhalten bei Trocken-Naßwechseln (vgl. Abschnitt 7.7)
- Materialverhalten bei Wasserlagerung (vgl. Abschnitt 7.8)

Sofern die Prüfkörper bei der Wasserlagerung und der Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung weitgehend stabil bleiben, ist eine entsprechende Erosionsstabilität im allgemeinen gegeben. Die Prüfkörper sind mit der Verdichtungsarbeit des einfachen Proctorversuches ( $0.6 \text{ MNm/m}^3$ ) herzustellen, wobei die zu untersuchenden Einbauwassergehalte auf Werte zwischen dem Wassergehalt beim Proctoroptimum  $w_{pr}$  und  $w_{pr} + \text{ca. } 4\%$  beschränkt werden können. Es wird die Untersuchung von 3 Einbauwassergehaltsstufen empfohlen.

Für mit den Mischungen M6 und M9 vergleichbare Mischungszusammensetzungen sollten vorab Identitätsuntersuchungen durchgeführt werden. Hierfür werden die Ermittlung der Korngrößenverteilung des Sandes, der Proctorkurve der Mischung, sowie jeweils 2 einaxiale Druckprüfungen und jeweils ein Kompressionsversuch an Prüfkörpern mit Einbauwassergehalten von  $w = w_{pr}$  und  $w = w_{pr} + 3\%$  im Alter von 28 Tagen als ausreichend erachtet.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den hier vorgestellten Untersuchungsergebnissen und anderen im Rahmen von Eignungsuntersuchungen ermittelten Werten herzustellen, sollten die einzelnen Untersuchungen, wie in Abschnitt 7 beschrieben, durchgeführt werden.

Im Zusammenhang mit den Bauvorhaben Deponie Winkel (LK Berchtesgadener Land), Deponie Litzlwalchen (LK Traunstein) und Deponie Gallenbach (LK Augsburg) konnten bereits erste baupraktische Erfahrungen mit Rohrauflagermischungen vergleichbar mit der Mischung M9 gesammelt werden. Bei den genannten Bauvorhaben hat es sich bewährt, die weitgehend trockenen Feststoffkomponenten in einer Zwangsmischanlage innig zu vermischen und der Mischung abschließend die entsprechende Wassermenge zuzugeben. Die Eigenfeuchte der Ausgangsmaterialien sollte hierbei berücksichtigt werden.

Unmittelbar nach der Wasserzugabe und homogenen Durchmischung wurde das Rohrauflagermaterial jeweils chargenweise eingebaut (vgl. Fotografie auf der Anlage 6 Blatt 1). Hierbei wurde der Rohrauflagerbereich in ca. 20 cm dicken Lagen geschüttet und mit mittelschweren Plattenrüttlern lagenweise verdichtet. Das eigentliche Rohrauflager mit einem Öffnungswinkel von  $120^\circ$  wurde anschließend aus dem fertig verdichteten Auflagerbereich unter Zuhilfenahme einer entsprechend vorbereiteten Schablone ausgeschält (vgl. Fotografie auf der Anlage 6 Blatt 2). Ein aufgrund von Ungenauigkeiten beim Ausschälen des Rohraufagers bereichsweise vorhandener 0.5 bis 1 cm breiter Spalt zwischen Rohrkörper und Auflagermaterial (vgl. Fotografie auf der Anlage 6 Blatt 3) wurde mit einer dickflüssigen Zement-Ton-Suspension vergossen, wobei die Rohrleitungen bis zum Abbinden der Vergußmasse durch Ballastierung vor Auftrieb gesichert wurden (vgl. Fotografie auf der Anlage 6 Blatt 4).

Die Rohrauflagermischungen müssen bis zur ausreichenden Erhärtung nachbehandelt, d.h. vor Austrocknung und Aufweichung geschützt werden. Aufgrund mangelnder Frostsicherheit dürfen die Rohrauflagermischungen nicht durchfrieren.

Im Rahmen der Fremdüberwachung lassen sich bei Kontrollprüfungen die Einbauwasserhalte dieser hydraulisch gebundenen Mischungen nur unmittelbar nach dem Materialeinbau korrekt bestimmen, da beim einsetzenden Hydratationsprozeß ein Teil des Porenwassers gebunden wird. Günstige Verarbeitungszeiten liegen bei 2 bis 3 Stunden.

Für die Kontrollprüfungen sollten die Proben mittels Ausstechzylinder unmittelbar nach dem Einbau und der Verdichtung des Rohrauflagermaterials entnommen werden. An etwa alle 50 m entnommenen Proben sind der Wassergehalt und die Trockendichte und zusätzlich an etwa alle 100 m entnommenen Proben zusätzlich die einaxiale Druckfestigkeit und die Durchlässigkeit im Alter von 14 Tagen zu bestimmen. Pro Baumaßnahme sollten jedoch mindestens jeweils 3 Untersuchungen durchgeführt werden.



### Danksagung

Besonderer Dank gebührt dem Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, das die Finanzmittel für die Durchführung dieses Forschungsvorhabens bereitstellte.

Desweiteren sei der Firma SKW Trostberg gedankt, die auf ihrer Werksdeponie in Benetsham eine Aufgrabung eines aus einem Sand-Steinmehl-Bentonit-Zement-Gemisch hergestellten Rohrauflegerbereichs vornehmen ließ und damit eine Inaugenscheinnahme des eingebauten Gemischs erlaubte.

### Literaturverzeichnis

- [1] Böttcher, A.: Vorläufige Zulassungsgrundsätze des DIBT für Bauteile in Deponien, 11. Fachtagung "Die sichere Deponie", 27. und 28.02.1995, SKZ Süddeutsches Kunststoffzentrum
- [2] Carrier, W.F. / Beckman, J.F.: Correlation between index tests and the properties of remoulded clays, *Geotechnique* 34, 1984, pages 211-228
- [3] DIN 4226 Teil 1: Zuschlag für Beton, Zuschlag mit dichtem Gefüge, April 1983
- [4] DIN 19667: Dränung von Deponien, Technische Regeln für Planung, Bauausführung und Betrieb, Mai 1991
- [5] Floss, R.: Gutachtliche Stellungnahme zu den Eignungsuntersuchungen für das Rohrauflagermaterial der Deponien Hart a.d. Alz und Benetsham, Proj.-Nr. 6792/99, im Auftrag der SKW Trostberg, unveröffentlicht, 1991
- [6] Geil, M.: Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 28, 1989
- [7] Hilsdorf, H.K.: Beton; Betonkalender Teil 1, 83. Jahrgang 1994, Seite 1 bis 137
- [8] Hoch, A.: Probleme der Rohr- und Schachtstatik, Standsicherheitsnachweise, *AbfallwirtschaftsJournal* 4 (1992), Nr. 2, Seiten 164 bis 176
- [9] Hoch, A.: Vorgabe für den Einbau - Standsicherheitsnachweise von Bauwerken aus PE-HD in Deponien, 8. Fachtagung "Die sichere Deponie", 27. und 28.02.1992, SKZ Süddeutsches Kunststoffzentrum
- [10] Hoch, A. / Lottner, U. / Zanzinger, H.: Statische Berechnung von Rohrleitungen in Sickerwasserentsorgungssystemen bei Abfalldeponien, *Müll und Abfall* 1/1993, Seiten 25 bis 35

- [11] Hoch, A.: Statische Bemessung von Rohren und Schächten aus PE-HD, Grundlagen, statische Nachweise und Prüfung der Statik, 9. Fachtagung "Die sichere Deponie", 04. und 05.03.1993, SKZ Süddeutsches Kunststoffzentrum
- [12] Kutzner, C.: Injektionen im Baugrund, Enke Verlag 1991
- [13] Lang, H.-J. / Huder, J.: Bodenmechanik und Grundbau, 4. Auflage, Springer Verlag 1990
- [14] Muradi, M.S.: Beitrag zur Klärung der bodenmechanischen Eigenschaften künstlich verdichteter feinkörniger (bindiger) Böden; Mitteilungen aus dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule München, 1976
- [15] Ostermayer, H.: Die Scherfestigkeit verdichteter Kies-Sand-Ton-Gemische, Festschrift zum 65. Geburtstag von o.Prof. Dr.-Ing. R. Jelinek, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität München, 1979
- [16] Ostermayer, H.: Das Verhalten gemischtkörniger Böden im einachsigen Formänderungszustand, Mitteilungen aus dem Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität München, 1976
- [17] Portier, J.L.: Das wirkliche Verhalten von Bentonit-Zement-Schlämmen, neuere Anwendungsmöglichkeiten; Sitzung vom 19. April 1983, Analen des Technischen Instituts für Bauwesen und öffentliche Arbeiten, Serie Böden und Gründungen 186, Nr. 423 - März/April 1984
- [18] Schuster, P.: Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten von Silt-Sand-Fraktionen, die mit quellfähigem Ton vergütet werden, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Zürich Nr. 131, 1986
- [19] v. Soos, P.: Eigenschaften von Boden und Fels, ihre Ermittlung im Labor; Grundbautaschenbuch Teil 1, 4. Auflage 1990, S. 105 bis 203
- [20] Stiegeler, R.: Beanspruchung erdverlegter flexibler Rohrleitungen, Beitrag zur Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss, Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München, Heft 21, S. 531 bis 547

- [21] Stiegeler, R.: Optimierung von Rohraflagermaterial, Vortrag im Rahmen des 11. Nürnberger Deponieseminars, 11. und 12.05.1995 "Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien", LGA Landesgewerbeanstalt Bayern
  
- [22] Vali, H. / Kohler E.E. / Bachmann L. / Förster O.: Elektronenmikroskopische Untersuchungen von Mischungen aus Portlandzement mit Smectit-Suspensionen, Schriftenreihe Angewandte Geologie, Karlsruhe, Band 4, Seiten 275-303
  
- [23] Zanzinger, H. / Gartung, E. / Hoch, A.: Grundsatzuntersuchung über die statische Berechnung von Rohrleitungen in Sickerwasserentsorgungssystemen bei Abfalldeponien, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern, Heft 61, Eigenverlag, 1992
  
- [24] Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen, EAU 1990, Herausgegeben vom Arbeitsausschuß "Ufereinfassungen" der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Verlag Ernst & Sohn

### Anlagenverzeichnis

- Anlage 1, Blatt 1 bis 8: Tabellarische Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse
- Anlage 2, Blatt 1 bis 4: Fotodokumentation zur Verarbeitbarkeit der Mischungen M6 und M9
- Anlage 3, Blatt 1 und 2: Fotodokumentation zu Versuchen hinsichtlich Erosionsstabilität der Mischungen M6 und M9
- Anlage 4, Blatt 1 bis 4: Fotodokumentation zu Versuchen hinsichtlich der Beständigkeit gegenüber Trocken-Naß-Wechselbeanspruchung der Mischungen M6 bis M9
- Anlage 5, Blatt 1: Fotodokumentation der Aufgrabung auf der Deponie Benetscham im August 1995
- Anlage 6, Blatt 1 bis 4: Fotodokumentation der Rohrauflegerherstellung auf der Deponie Gallenbach im Oktober 1995

## Erläuterungen zur Anlage 1

	<u>Spaltenbezeichnung</u>	<u>Formelzeichen</u>	<u>Erläuterung</u>
1	qu	$q_u$	Einaxiale Druckfestigkeit
2	zugeh. eps	zugehöriges $\varepsilon$	Bruchstauchung beim einaxialen Druckversuch
3	roh d	$\rho_d$	Trockendichte der Mischung
4	roh Pr	$\rho_{Pr}$	Proctordichte
5	w	w	Wassergehalt des Prüfkörpers beim einaxialen Druckversuch
6	w Pr	$w_{Pr}$	optimaler Wassergehalt der Proctordichte
7	E 200-600	E	E-Modul als Sekantenmodul im Spannungsbereich zwischen 200 und 600 kN/m <sup>2</sup>
8	i	i	hydraulischer Gradient i
9	k-Wert	k	Durchlässigkeitsbeiwert k
10	nach 7d Wala		Nach 7 Tagen Wasserlagerung
11	Erosion nach 5d mit 5m WS		Ergebnis des Erosionsversuches nach 5 Tagen Durchströmung bei 5 m Wassersäule Differenzdruck
12	mittl. sigma	mittl. $\sigma$	mittleres Spannungsniveau im Spannungsbereich
13	Es1	$E_{s1}$	Steifemodul aus der Erstbelastung
14	sig3-1	$\sigma_{3-1}'$	effektive Seitenspannung $\sigma_3$ im Triaxialversuch nach der Mehrstufentechnik; 1.Laststufe
15	sig3-2	$\sigma_{3-2}'$	effektive Seitenspannung $\sigma_3$ im Triaxialversuch nach der Mehrstufentechnik; 2.Laststufe
16	sig3-3	$\sigma_{3-3}'$	effektive Seitenspannung $\sigma_3$ im Triaxialversuch nach der Mehrstufentechnik; 3.Laststufe
17	(s1-s3)/2	$(\sigma_1' - \sigma_3')/2$	Differenz der effektiven Hauptspannungen *1/2 im Bruchzustand für $\sigma_{3-1}'$ (vgl. Zeile 14)
18	(s1-s3)/2	$(\sigma_1' + \sigma_3')/2$	Summe der effektiven Hauptspannungen *1/2 im Bruchzustand für $\sigma_{3-1}'$ (vgl. Zeile 14)
19	fi'	$\varphi'$	effektiver Winkel der inneren Reibung
20	c'	c'	effektive Kohäsion

Versuchsergebnisse FE-Rohraufleger:

<b>Mischung:</b>	<b>M1</b>		
Sand [%]:	75 Körnung 0/4a mm	Proctordichte	Proctorwassergehalt
Füller [%]:	15 Kaolin-Tonmehl	roh Pr:	w Pr:
Bentonit [%]:	6 Ca-Bentonit	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
Zement [%]:	4 HOZ 35 L	2,060	11,5

**nach 7 Tagen**

Einbauwassergehalt:	qu	zugeh. eps	roh d	w	E	i	k-Wert
[%]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]	200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m/s]
9	1440	0,64	1,938	8,2	395	15	1,1E-06
12	3113	0,72	2,041	10,9	763	16	1,7E-10
15	1501	2,66	1,941	13,2	105	14	2,0E-11
18	928	0,9	1,806	16,2	804	15	3,9E-10
21	718	1,86	1,733	18,6	70	15	1,9E-12

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt:	qu	zugeh. eps	roh d	w	E	i	k-Wert
[%]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]	200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m/s]
9	1406	1,45	1,917	7,7	224	15	5,3E-07
12	4122	0,61	2,032	10,3	1585	16	2,4E-12
15	2720	1,45	1,948	12,9	624	16	8,3E-13
18	1352	1,57	1,842	15,7	312	16	2,0E-12
21	927	1,09	1,734	18,5	230	15	9,3E-12

Versuchsergebnisse FE-Rohraufleger:

<b>Mischung:</b>	<b>M2</b>		
Sand [%]:	75 Körnung 0/4a mm	Proctordichte	Proctorwassergehalt
Füller [%]:	15 Kaolin-Tonmehl	roh Pr:	w Pr:
Bentonit [%]:	8 Ca-Bentonit	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
Zement [%]:	2 HOZ 35 L	1,969	11,5

**nach 7 Tagen**

Einbauwassergehalt:	qu	zugeh. eps	roh d	w	E	i	k-Wert
[%]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]	200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m/s]
9	887,88	0,72	1,892	8,3	147	15	4,8E-06
12	991,95	0,73	1,962	11,6	321	30	5,6E-11
15	560,2	2,5	1,902	14,4	16	30	4,8E-11
18	228,22	2,51	1,781	17,3	9	28	7,3E-11
21	183,3	2,51	1,7	19,5	7	16	1,6E-09

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt:	qu	zugeh. eps	roh d	w	E	i	k-Wert
[%]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]	200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m/s]
9	697,68	1,61	1,894	8,5	61	16	6,4E-07
12	839,26	1,62	1,954	11,6	94	20	3,8E-10
15	597,37	3,1	1,905	14,2	16	26	6,1E-11
18	347,74	3,31	1,814	16,9	11	26	1,0E-10
21	269,32	2,11	1,697	19,4	13	21	3,8E-10

**Versuchsergebnisse FE-Rohraufleger:**

<b>Mischung:</b>	<b>M3</b>		
Depomix 20 [%]:	98	Proctordichte	Proctorwassergehalt
Zement [%]:	2 HOZ 35 L	roh Pr:	w Pr:
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
		1,990	10,3

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt:	qu	zugeh. eps	roh d	w	E 200-600	i	k-Wert
[%]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m/s]
9	1690,2	0,5	1,945	8,7	749	19	2,2E-10
12	1303,93	1,71	1,977	11,3	156	19	1,9E-11
15	609,4	2,42	1,84	14,4	16	19	3,3E-11
18	464,35	2,94	1,726	17,1	8	19	1,1E-10
21	322,5	2,76	1,65	20,1	5	19	1,2E-10

**Versuchsergebnisse FE-Rohraufleger:**

<b>Mischung:</b>	<b>M4</b>		
Sand [%]:	72,5 Körnung 0/4a mm	Proctordichte	Proctorwassergehalt
Füller [%]:	18 Kaolin-Tonmehl	roh Pr:	w Pr:
Bentonit [%]:	7 Ca-Bentonit	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
Zement [%]:	2,5 HOZ 35 L	1,986	12,0

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt:	qu	zugeh. eps	roh d	w	E 200-600	i	k-Wert
[%]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m/s]
9	1123	1,16	1,872	8,8	146	33	3,3E-06
12	1193	1,49	1,974	12,1	107	30	8,5E-10
15	657	2,87	1,872	14,8	26	29	1,0E-10
18	559	2,05	1,783	17,2	21	30	7,8E-11
21	344	1,72	1,682	19,9	17	30	1,4E-09

**Versuchsergebnisse FE-Rohraufleger:**

<b>Mischung:</b>	<b>M5</b>		
Sand [%]:	72 Körnung 0/4a mm	Proctordichte	Proctorwassergehalt
Füller [%]:	18 Kaolin-Tonmehl	roh Pr:	w Pr:
Bentonit [%]:	7 Ca-Bentonit	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
Zement [%]:	3 HOZ 35 L	1,960	11,0

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt:	qu	zugeh. eps	roh d	w	E 200-600	i	k-Wert
[%]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m/s]
9	1022,93	1	1,862	8,9	157	25	3,2E-06
12	1504,01	0,98	1,943	11,6	205	30	5,4E-09
15	772,9	2,7	1,881	14,7	41	27	6,2E-11
18	661,78	1,96	1,772	17,6	54	29	4,1E-11
21	543,89	1,38	1,684	20,3	28	28	5,5E-11



**Versuchsergebnisse FE-Rohraufleger:**

**Mischung:**  
 Sand [%]: 70 Körnung 0/4a mm  
 Füller [%]: 20 Kaolin-Tonmehl  
 Bentonit [%]: 7 Ca-Bentonit  
 Zement [%]: 3 HOZ 35 L

**M6**  
 Proctorwassergehalt w Pr: 12,3  
 Proctordichte roh Pr: 1,954 [g/cm3]

**nach 7 Tagen**

Einbauwassergehalt [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	w [%]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	nach 7 d		E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]
						Wala qu [kN/m <sup>2</sup> ]	Wala k-Wert [m/s]	
9	665	0,84	1,789	8,2	113	137	1,833	8
12	1356	1,01	1,919	11,2	181	625	1,904	57
15	1052	1,43	1,917	14,1	106	409	1,815	17
18	667	1,87	1,811	16,5	40			
21	509	1,28	1,712	19,5	39			

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	w [%]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	nach 14 d		E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]
						Wala qu [kN/m <sup>2</sup> ]	Wala k-Wert [m/s]	
9	768	1,03	1,819	8,4	119	29	7,64E-07	
12	1571	1,13	1,890	12,3	196	30	1,76E-09	
15	1445	1,78	1,920	13,8	108	25	1,40E-11	
18	790	2,01	1,798	16,7	69	28	5,11E-11	
21	636	3,17	1,722	18,9	22	29	4,47E-11	

**nach 28 Tagen**

Einbauwassergehalt [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	w [%]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	nach 28 d		E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	Erosion nach 5d mit 5m WS	nach 10m WS	nach 10m Naß-Wechsel bei 40°C	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]
						Wala qu [kN/m <sup>2</sup> ]	Wala k-Wert [m/s]					
9	432	1,69	1,758	8,7	55	29	5,70E-08	sehr gering	sehr gering	zerfällt	110	
12	1123	1,35	1,890	10,6	146	25	2,83E-10	sehr gering	sehr gering	sandet ab	47	
15	1216	2,67	1,923	13,7	64	28	9,10E-11	sehr gering	sehr gering	sandet ab	110	
18	732	3,17	1,811	16,3	33	30	1,09E-10	sehr gering	sehr gering	sandet ab	47	
21	706	2,54	1,733	18,8	50	673	1,07E-10	sehr gering	sehr gering	sandet ab	47	
9	448	1,18	1,741	8,4	47							
12	846	2,19	1,874	11,0	87							
15	719	2,27	1,867	14,1	40							
18	688	3,61	1,801	16,5	25							
21	732	2,48	1,688	18,6	40							

**M6 Kompressionsversuche:**

für Wassergehalt w: [%]	12	15	18
roh d Versuchsbeginn [t/m <sup>3</sup> ]	1,864	1,890	1,800
mittl. Spannungsbereich [kN/m <sup>2</sup> ]			
sigma [kN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]
52			
103	77	71	83
202	152	71	125
402	302	60	60
801	602	99	81
1201	1001	109	94

**M6 Triaxialversuche:**

für Wassergehalt w: 12 [%]				(s1-s3)/2	(s1+s3)/2	fi'	c'	
Mehrstufenversuch	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	sig3-1 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-2 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-3 [kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[°]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Versuch 1	1,896	60	120	200	341	396	33,6	150,0
Versuch 2	1,876	120	200	280	354	469	27,9	155,6
Versuch 3	1,856	200	280	360	372	549	25,1	156,4

für Wassergehalt w: 15 [%]				(s1-s3)/2	(s1+s3)/2	fi'	c'	
Mehrstufenversuch	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	sig3-1 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-2 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-3 [kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[°]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Versuch 1	1,91	60	120	200	419	470	40,9	148,9
Versuch 2	1,909	120	200	280	400	499	35,6	138,3
Versuch 3	1,932	200	280	360	631	783	33,8	238,3

**Versuchsergebnisse FE-Rohraufleger:**

**Mischung:** M7  
 Sand [%]: 70 Körnung 0/4a mm  
 Füller [%]: 20 Kaolin-Tonmehl  
 Bentonit [%]: 7 Ca-Bentonit  
 Aquament [%]: 3 Spezialbindemittel

**Proctordichte**  
 roh Pr: [g/cm<sup>3</sup>]  
 1,951

**Proctorwassergehalt**  
 w Pr: [%]  
 11,7

**nach 7 Tagen**

Einbauwassergehalt: [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>2</sup> ]	w [%]	E	
					200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]
9	414	0,82	1,760	8,5	61	
12	841	1,13	1,894	11,3	124	
15	602	2,38	1,913	13,9	36	
18	311	2,47	1,813	16,8	11	
21	167	2,81	1,761	18,0	13	

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt: [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>2</sup> ]	w [%]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	i [-]	k-Wert [m/s]
12	950	2,37	1,941	11,2	79	27	1,13E-09
15	710	2,36	1,921	14,0	40	27	6,93E-11
18	392	2,52	1,806	16,6	12	28	1,99E-10
21	309	2,34	1,708	19,0	15	29	5,30E-10

**nach 28 Tagen**

Einbauwassergehalt: [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>2</sup> ]	w [%]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	i [-]	k-Wert [m/s]	nach 7 d		Erosion nach 5d mit 5m WS	nach 10 Trocken-Naß-Wechsel bei 40°C	zugeh. eps [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]
								Wala [kN/m <sup>2</sup> ]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]					
9	399	1,20	1,760	8,8	37	28	1,87E-09	282	1,99	keine	nach 5d mit 10m WS	1886	1886	11
12	884	1,52	1,890	11,3	103	28	1,71E-08	456	1,85	keine	nach 5d mit 10m WS	1057	1057	39
15	760	2,30	1,923	13,9	46	29	6,78E-11	373	1,72	keine	nach 5d mit 10m WS	1886	1886	25
18	402	4,00	1,809	16,7	11	29	1,96E-10	geringe Aufweichungen	1,85	keine	nach 5d mit 10m WS	1057	1057	35
21	349	3,17	1,711	19,4	10	30	1,41E-10		1,72	keine	nach 5d mit 10m WS	1057	1057	35

**Kompressionsversuche M7:**

für Wassergehalt w: [%]	12	15	18
roh d Versuchsbeginn [t/m <sup>2</sup> ]	1,998	1,919	1,801
mittl. sigma [kN/m <sup>2</sup> ]	Es1	Es1	Es1
Spannungsbereich [kN/m <sup>2</sup> ]	Es1	Es1	Es1
52			
102	77	62	50
202	152	130	53
402	302	146	54
801	602	166	56
1201	1001	213	59

**Versuchsergebnisse FE-Rohrauflager:**

**Mischung:**

Sand [%]: 70 Körnung 0/4a mm  
Füller [%]: 20 Kaolin-Tonmehl  
Bentonit [%]: 7 Ca-Bentonit  
Protomix C [%]: 3 Spezialbindemittel

**M8**

Proctordichte  
roh Pr:  
[g/cm<sup>3</sup>]  
2,032

Proctornassergehalt  
w Pr:  
[%]  
10,8

**nach 7 Tagen**

Einbauwassergehalt: [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	w [%]	E	
					200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	87 124 6
9	513	0,91	1,843	8,6	87	
12	797	1,08	1,959	11,1	124	
15	249	4,04	1,893	14,2	6	
18	126	3,08	1,831	16,6		
21	69	4,42	1,718	19,0		

**nach 14 Tagen**

Einbauwassergehalt: [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	w [%]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	i [-]	k-Wert [m/s]
12	849	0,98	2,022	11,2	139	29	2,52E-10
15	247	3,47	1,889	14,2	30	30	2,71E-10
18	142	2,62	1,795	16,8	30	30	4,45E-10
21	93	2,89	1,793	19,5	28	28	8,31E-10

**nach 28 Tagen**

Einbauwassergehalt: [%]	qu [kN/m <sup>2</sup> ]	zugeh. eps [%]	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	w [%]	E 200-600 [MN/m <sup>2</sup> ]	i [-]	k-Wert [m/s]	nach 7 d		Erosion nach 5d mit 5m WS	nach 5d mit 10m WS	Trocken- Naß-Wechsel bei 40°C
								Wala qu [kN/m <sup>2</sup> ]	roh d [t/m <sup>3</sup> ]			
9	531	1,22	1,806	8,4	67	29	3,56E-08	268	1,49	1,992	12,1	alle Proben zerfallen nach wenigen T-N-Wechseln
12	891	1,97	1,974	11,3	106	28	1,43E-10	62	3,38	1,863	15,4	gering
15	332	4,14	1,894	14,1	17	27	1,01E-10	45	1,17	1,784	18,1	gering
18	188	2,31	1,801	16,4		29	1,32E-10	Proben sind aufgeweicht				gering
21	109	3,90	1,667	19,4		29	3,10E-10					gering



**M9 Kompressionsversuche:**

Erstversuche:

für Wassergehalt w: [%]		12	15	18
roh d	Versuchsbeginn [t/m <sup>3</sup> ]	2,002	1,922	1,812
mittl. Spannungsbereich				
	sigma [kN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]
52				
102	77	37	43	46
202	152	50	59	49
402	302	62	80	57
801	602	93	103	73
1201	1001	137	121	90

Wiederholungsversuche:

für Wassergehalt w: [%]		12	15	18
roh d	Versuchsbeginn [t/m <sup>3</sup> ]	1,951	1,879	1,785
mittl. Spannungsbereich				
	sigma [kN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Es1 [MN/m <sup>2</sup> ]
52				
102	77	26	15	28
202	152	38	19	37
402	302	60	27	49
801	602	106	50	62
1201	1001	154	82	83

**M9 Triaxialversuche:**

für Wassergehalt w: 12 [%]

Mehrstufenversuch	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	sig3-1 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-2 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-3 [kN/m <sup>2</sup> ]	(s1-s3)/2 [kN/m <sup>2</sup> ]	(s1+s3)/2 [kN/m <sup>2</sup> ]	fi' [°]	c' [kN/m <sup>2</sup> ]
Versuch 1	1,973	60	120	200	517	576	32,7	262,3
Versuch 2	1,963	120	200	280	586	675	32,2	270,7
Versuch 3	1,954	200	280	360	566	715	32,0	221,2

für Wassergehalt w: 15 [%]

Mehrstufenversuch	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	sig3-1 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-2 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-3 [kN/m <sup>2</sup> ]	(s1-s3)/2 [kN/m <sup>2</sup> ]	(s1+s3)/2 [kN/m <sup>2</sup> ]	fi' [°]	c' [kN/m <sup>2</sup> ]
Versuch 1	1,906	60	120	200	276	326	44,9	64,8
Versuch 2	1,873	120	200	280	339	418	38,8	101,6
Versuch 3	1,871	200	280	360	329	434	36,5	88,1

für Wassergehalt w: 18 [%]

Mehrstufenversuch	roh d [t/m <sup>3</sup> ]	sig3-1 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-2 [kN/m <sup>2</sup> ]	sig3-3 [kN/m <sup>2</sup> ]	(s1-s3)/2 [kN/m <sup>2</sup> ]	(s1+s3)/2 [kN/m <sup>2</sup> ]	fi' [°]	c' [kN/m <sup>2</sup> ]
Versuch 1	1,775	60	120	200	323	354	43,1	114,2
Versuch 2	1,755	120	200	280	351	414	43,7	95,1
Versuch 3	1,800	200	280	360	474	601	38,8	128,4