

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig



Heft Nr. 29

IGB·TUBS

Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen

von
Thomas Kruse

Braunschweig 1989
(2. Auflage 1992)

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig beschäftigt sich auf Anregung seines leider viel zu früh verstorbenen Begründers Prof. Dr.-Ing. Hanns Simons seit einigen Jahren mit Deponieabdichtungen. Untersucht wurden Einsatzmöglichkeiten von Abdichtungsverfahren, die aus dem Grund- und Wasserbau bekannt sind. Die vorliegende Arbeit ergänzt die Reihe der bereits behandelten Themen, die durch den engen Kontakt mit der Praxis an das Institut herangetragen wurden.

Nachdem Arbeiten über die Eignung und Herstellung von Dichtwänden für die Umschließung von Altlasten sowie von mineralischen Abdichtungen bei neu anzulegenden Deponiebauwerken vorliegen, behandelt diese Arbeit Standsicherheitsprobleme von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen.

Herr Thomas Kruse hat das Thema der Standsicherheit umfassend erläutert und die relevanten Parameter, die die Scherfestigkeit zwischen Böden und Kunststoffdichtungsbahnen beeinflussen, untersucht. Auf der Grundlage der Untersuchungen hat er Empfehlungen für die versuchstechnische Ermittlung von Scherparametern und für Berechnungsansätze, die bei der Planung von Kombinationsabdichtungen auf Böschungen verwendet werden können, erarbeitet.

Braunschweig, im September 1989

Walter Rodatz

INHALTSVERZEICHNIS	Seite	
1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung und Aufbau der Arbeit	2
1.2	Ziel der Arbeit	4
2	STAND DER TECHNIK	5
2.1	Deponien	5
2.1.1	Deponiearten	5
2.1.2	Deponieformen	5
2.1.3	Deponieabdichtungen	6
2.2	Beanspruchungen und Anforderungen an die Deponieabdichtungen	7
2.2.1	Kunststoffdichtungsbahnen	7
2.2.2	Mineralische Abdichtungen	10
2.3	Standsicherheitsbetrachtungen	12
2.3.1	Erforderliche Nachweise	12
2.4	Ermittlung der Scherfestigkeit von Böden und zwischen Böden und Kunststoff- dichtungsbahnen	20
2.4.1	Physikalische Grundlagen	20
2.4.2	Scherfestigkeit von Böden	23
2.4.3	Scherfestigkeit zwischen Böden, Kunststoffdichtungsbahnen und verschiedenen Baumaterialien	36
2.4.4	Versuchstechnik	45
3	EIGENE UNTERSUCHUNGEN ZUM REIBUNGSVERHALTEN ZWISCHEN KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHNEN MIT VER- SCHIEDENER OBERFLÄCHENSTRUKTUR UND BÖDEN	48
3.1	Überblick über die eigenen Untersuchungen	48
3.2	Verwendete Kunststoffdichtungsbahnen	50

3.3	Scherversuche mit nichtbindigen, gleichförmigen Sanden	53
3.3.1	Verwendete Böden und Versuchsmethodik	53
3.3.2	Versuche mit Mittelsand B1	57
3.3.3	Versuche mit Feinsand B2	61
3.3.4	Versuche mit Grobsand B3	62
3.3.5	Zusammenstellung der Ergebnisse	64
3.4	Scherversuche mit ungleichförmigen Sanden	66
3.4.1	Verwendete Böden und Versuchsmethodik	66
3.4.2	Versuchsergebnisse	67
3.5	Scherversuche mit Kies	70
3.5.1	Verwendeter Boden und Versuchsmethodik	70
3.5.2	Versuchsergebnisse	72
3.6	Scherversuche mit bindigen Böden	74
3.6.1	Verwendete Böden und Versuchsmethodik	74
3.6.2	Versuche mit bindigen Böden bei optimalem Einbauwassergehalt	78
3.6.3	Einfluß des Wassergehaltes auf die Scherfestigkeit zwischen einer glatten Kunststoffdichtungsbahn und bindigen Böden	84
3.6.4	Einfluß kurzfristiger hoher Belastungen	96

	Seite	
3.7	Herausziehversuche	99
3.7.1	Versuchsmethodik	99
3.7.2	Versuchsergebnisse	101
3.8	Reibungsverhalten zwischen Geotextilien, Böden und glatten Kunststoffdichtungs- bahnen	103
3.8.1	Versuchsmethodik	103
3.8.2	Versuchsergebnisse	106
4	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE UND EMPFEHLUNGEN	111
4.1	Vorbemerkungen	111
4.2	Empfehlungen für die versuchstechnische Ermittlung von Scherparametern	111
4.3	Übertragbare Scherfestigkeiten zwischen Dichtungsbahnen und Böden	114
4.3.1	Empfehlungen für Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahnen und nicht- bindigen Böden	114
4.3.2	Empfehlungen für Reibungswinkel und Adhäsion zwischen Dichtungs- bahnen und bindigen Böden	116
4.4	Auswirkungen auf die Standsicherheit von Kombinationsabdichtungssystemen	119
4.4.1	Allgemeines	119
4.4.2	Auswirkungen auf die Bauphase von geneigten Basisabdichtungen	120
4.4.3	Betriebs- und Endphase der Deponien	130
4.4.4	Oberflächenabdichtungen	134
5	ZUSAMMENFASSUNG	138
	LITERATURVERZEICHNIS	139

VERWENDETE FORMELZEICHEN UND BEGRIFFE

a'	Adhäsion
b	Breite der Scherfläche
c'	Kohäsion
D	Lagerungsdichte
d_{15}	Korndurchmesser bei 15 % Massenanteilen
d_{85}	Korndurchmesser bei 85 % Massenanteilen
D_{Pr}	Verdichtungsgrad
e	Porenzahl
e_{kr}	Kritische Porenzahl
e_{min}	Porenzahl bei dichtester Lagerung
e_{max}	Porenzahl bei lockerster Lagerung
F	Fläche
H	Horizontalkraft
I_c	Konsistenzzahl
I_p	Plastizitätszahl
n	Porenanteil
n_{min}	Porenanteil bei dichtester Lagerung
n_{max}	Porenanteil bei lockerster Lagerung
N	Normalkraft
R	Reibungskraft
T_o	Schubkraft oberhalb der Dichtungsbahn
T_u	Schubkraft unterhalb der Dichtungsbahn
U	Ungleichförmigkeitsgrad
v_h	Horizontalverschiebung
w_n	natürlicher Wassergehalt

w_{opt}	Wassergehalt bei Proctordichte
w_{97}	Wassergehalt bei 97 % Proctordichte
w_{95}	Wassergehalt bei 95 % Proctordichte
w_L	Fließgrenze
w_p	Ausrollgrenze
w_s	Schrumpfgrenze
Z	Zugkraft
α	Böschungswinkel
δ'	Reibungswinkel zwischen verschiedenen Materialien
η	Standsicherheit
γ	Wichte des Bodens
μ_v	bezogener Reibungsbeiwert $\tan \delta' / \tan \varphi'$
φ'	Reibungswinkel des Bodens
ρ_{pr}	Proctordichte
ρ	Dichte des feuchten Bodens
ρ_d	Dichte des trockenen Bodens
ρ_s	Korndichte
G_N	Normalspannung
$\tan \varphi'$	Reibungsbeiwert des Bodens
$\tan \delta'$	Reibungsbeiwert zwischen Dichtungsbahn und Boden
τ_F	Scherfestigkeit des Bodens
τ_{DB}	Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden

1 EINLEITUNG

Abfälle, die sichtbaren Zeichen unserer "Wegwerfgesellschaft", stellen trotz aller Bemühungen und Erfolge um Wiederverwertung und Abfallvermeidung ein beachtliches Umweltgefährdungspotential dar. Die Gefährdung der Umwelt geht dabei weniger von den gewaltigen Abfallmengen als von der Zusammensetzung der Abfälle aus. In der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich rund 250 Mio. Tonnen Abfälle an, und die Tendenz ist trotz aller Wiederverwertungs- und Vermeidungsbemühungen steigend. Der größte Teil dieser Abfälle muß auf Deponien gelagert werden, daher sind diese derart zu gestalten, daß eine Gefährdung der Umwelt und des Grundwassers durch die in der Deponie entstehenden Sickerwässer und Gase langfristig vermieden werden kann.

Auftretende Umweltverunreinigungen durch Alt-Deponien der vergangenen Jahrzehnte haben dazu geführt, daß die Anforderungen an die Abdichtung von Deponien in den letzten Jahren erheblich gestiegen sind, um eine dauerhafte, umweltschonende Ablagerung der anfallenden Abfallmengen gewährleisten zu können. Früher wurden keine oder nur Abdichtungsmaßnahmen in geringem Umfang und, wie sich teilweise nachträglich herausstellte, unzulängliche Abdichtungsmaßnahmen ausgeführt. Heute werden zum Schutz von Grundwasser und Boden an der Deponiebasis Kombinationsabdichtungen aus mineralischen Abdichtungsmaterialien geringer Wasserdurchlässigkeit und Kunststoffdichtungsbahnen hergestellt, um ein Austreten der in der Betriebsphase der Deponie entstehenden Sickerwässer in den Untergrund zu verhindern. Durch die Anordnung von Dränagesystemen oberhalb der Dichtungsschicht wird eine Erfassung und Behandlung dieser Sickerwässer in Kläranlagen ermöglicht. Nach dem Verfüllen der Deponie wird an der Oberfläche des entstandenen Müllkörpers ebenfalls eine Kombinationsabdichtung angeordnet, um eine Infiltration von Regenwasser und damit die Entstehung weiterer Sickerwassermengen zu vermeiden und eine geordnete Erfassung und Beseitigung der durch Verrottungsprozesse entstehenden Deponiegase sicherzustellen. Die somit erreichte vollständige Umschließung des verfüllten

Deponiekörpers soll einen langfristigen, dauerhaften Schutz von Grundwasser und Umwelt gewährleisten.

Nachfolgende Vorteile dieser kombinierten Bauweise haben in den letzten Jahren zu ihrer bevorzugten Anwendung beigetragen. Die wasserundurchlässigen Kunststoffdichtungsbahnen verhindern einen direkten Kontakt der entstehenden Sickerwässer mit der mineralischen Dichtungsschicht, und stellen für diese einen Schutz vor Durchfeuchtung und Auslaugung durch eventuell auftretende aggressive Sickerwasserinhaltsstoffe dar. Die dichtende Wirkung der mineralischen Dichtungsschicht dient als zusätzliche Sicherheit und verhindert aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit und ihres Adsorptionsvermögens den direkten Austritt von belastenden Deponieinhaltsstoffen in den Untergrund und das Grundwasser, falls in der i.a. 2 - 4 mm starken Dichtungsbahn eine Fehlstelle auftreten sollte. Zusätzlich haben Versuche ergeben, daß sich die Permeation von chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) durch die Kunststoffdichtungsbahn erheblich reduziert, wenn diese im Verbund mit bindigem, mineralischem Dichtungsmaterial verlegt wird. Durch die kombinierte Bauweise von Oberflächenabdichtungen wird eine Erfassung, Beseitigung oder Nutzung der entstehenden Deponiegase bei gleichzeitiger Verhinderung von Regenwasserinfiltration und somit Sickerwasserneubildung erreicht.

1.1 Problemstellung und Aufbau der Arbeit

Bei der Herstellung von Kombinationsabdichtungen an der Deponiebasis oder Oberfläche ergeben sich während der Bau- und Betriebsphase sowie nach Abschluß des Deponiebetriebes vielfältige Belastungen und Anforderungen an die Kombinationsabdichtung. Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die Einsatzgebiete der Kombinationsabdichtung, ihr Aufbau, die Beanspruchungen und die daraus resultierenden Anforderungen aufgezeigt.

Werden Kombinationsabdichtungen auf Böschungen verlegt, spielt für die Standsicherheit das Reibungsverhalten zwischen der Kunststoffdichtungsbahn und dem mineralischen Abdichtungsmaterial unterhalb der Dichtungsbahn sowie das Reibungsverhalten zwischen der oberhalb der Dichtungsbahn befindlichen Schutz- und Dränageschicht eine wesentliche Rolle. Die Bedeutung des Reibungsverhaltens für die Standsicherheit und die sich daraus ergebenden Belastungen der Kombinationsabdichtung sowie einige Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Standsicherheit werden deshalb erläutert. Auch die zur Ermittlung des Reibungsverhaltens notwendigen theoretischen Grundlagen und die dazu erforderliche Versuchstechnik werden beschrieben. Die wesentlichen bodenmechanischen Einflußparameter auf das Reibungsverhalten verschiedener mineralischer Abdichtungs- und Dränagematerialien werden ebenfalls erläutert und dargestellt. Anschließend werden bereits bestehende Untersuchungen zu Reibungsverhalten zwischen Böden und verschiedenen anderen Baumaterialien und Kunststoffdichtungsbahnen vorgestellt. Im Anschluß daran folgen eigene Untersuchungen zum Reibungsverhalten zwischen Kunststoffdichtungsbahnen mit verschiedener Oberflächenrauigkeit und mehreren nichtbindigen Filter- und bindigen Abdichtungsmaterialien. Durch die Untersuchung des Reibungsverhaltens zwischen verschiedenen Dichtungsbahnen unterschiedlicher Oberflächenrauigkeit und verschiedenen Materialien werden die Größe der jeweils übertragbaren Scherkräfte ermittelt und die Einflußparameter auf die übertragbaren Scherkräfte aufgezeigt. Zusätzlich wird das Reibungsverhalten zwischen Böden, Dichtungsbahnen und Geotextilien, die als Schutz-, Filter- und Trennschichten innerhalb von Kombinationsabdichtungssystemen zum Einsatz kommen, untersucht. Langzeiteinwirkungen aus Deponiegasen, höheren Temperaturen, die durch Verrottungsprozesse innerhalb des Deponiekörpers auftreten können, und Sickerwassereinwirkungen auf die Kunststoffdichtungsbahn, die gegebenenfalls zu Veränderungen der Kunststoffeigenschaften führen, wurden nicht berücksichtigt, da sie in ihrer Größe und Zusammenwirkung kaum abschätzbar und simulierbar sind. Möglicherweise auftretende Langzeitveränderungen des mineralischen Dichtungsmaterials durch Temperatureinflüsse oder Konsolidationsvorgänge sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Im letzten Teil der Arbeit werden die vorliegenden Versuchsergebnisse zusammengefaßt und daraus Empfehlungen für die versuchstechnische Ermittlung von Reibungsbeiwerten für die verschiedenen Komponenten der Kombinationsabdichtung abgeleitet. Außerdem wird für verschiedene Dichtungsbahnen und Böden die zu erwartende Größe der übertragbaren Scherkräfte angegeben. Anschließend wird aufgezeigt, wie sich die gewonnenen Erkenntnisse auf die Gestaltung standsicherer und dauerhafter Kombinationsabdichtungen auswirkt.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist, die wesentlichen bodenmechanischen Einflußparameter auf das Reibungsverhalten zwischen verschiedenen mineralischen Abdichtungs-, Drainage-, Schutzmaterialien und Kunststoffdichtungsbahnen unterschiedlicher Oberflächenrauigkeit zu untersuchen und ihre Auswirkungen auf die Standsicherheit der Kombinationsabdichtung während unterschiedlicher Bau- und Betriebsphasen aufzuzeigen.

Durch die Auswahl in der Deponietechnik üblicher Abdichtungs- und Filtermaterialien sowie die Verwendung von Kunststoffdichtungsbahnen unterschiedlicher Oberflächenstruktur sollen die Versuchsergebnisse einen Beitrag zur sicheren Gestaltung von geeigneten Kombinationsabdichtungen für zukünftige Deponien leisten. Mit dieser Zielsetzung werden unter Berücksichtigung bereits vorhandener Veröffentlichungen und aufgrund eigener Versuchsergebnisse Empfehlungen für die versuchstechnische Ermittlung von Reibungsbeiwerten gegeben. Für Vorplanungen werden Scherparameter für den Ansatz von Reibungsbeiwerten zwischen Böden, Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen empfohlen. Speziell für das mineralische Abdichtungsmaterial wird der Einfluß unterschiedlicher Wassergehalte auf die übertragbaren Scherkräfte untersucht. Außerdem wird aufgezeigt, in welcher Weise sich das unterschiedliche Reibungsverhalten zwischen den einzelnen Komponenten des Kombinationsabdichtungssystems auf die Planung und Herstellung von geeigneten Kombinationsabdichtungen auswirkt.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Deponien

2.1.1 Deponiearten

Nach der einzulagernden Abfallart und dem daraus resultierenden Gefährdungspotential des Deponiegutes werden im wesentlichen folgende Deponiearten unterschieden:

- Bauschutt- und Erddeponien
- Hausmülldeponien
- Sondermülldeponien
- End- und Zwischenlager für radioaktives Material.

Den überwiegenden Anteil der bestehenden bzw. neu zu errichtenden Deponien bilden entsprechend dem hohen Abfallaufkommen an Hausmüll und Bauschutt die Deponien für diese Abfallarten.

2.1.2 Deponieformen

Nach der jeweiligen Gestalt bzw. Lage der Deponien werden an Deponieformen unterschieden:

- Muldendeponie
- Haldendeponie
- Hangdeponie
- Kavernen- bzw. Untertagedeponie
- Behälterdeponie.

Die gebräuchlichsten Deponieformen für Hausmüll-, Bauschutt- und Erddeponien sind Mulden-, Halden- und Hangdeponien.

2.1.3 Deponieabdichtungen

Um einen dauerhaften Schutz des Grundwassers und des umgebenden Bodens zu gewährleisten, müssen die Deponien ausreichend abgedichtet werden. Zu diesem Zweck werden Kunststoffdichtungsbahnen zusammen mit mineralischen Abdichtungsmaterialien an der Deponiebasis und -oberfläche ausgeführt. Der Aufbau einer Deponiebasis- und einer -oberflächenabdichtung als Kombinationsabdichtung ist in Bild 1 dargestellt.

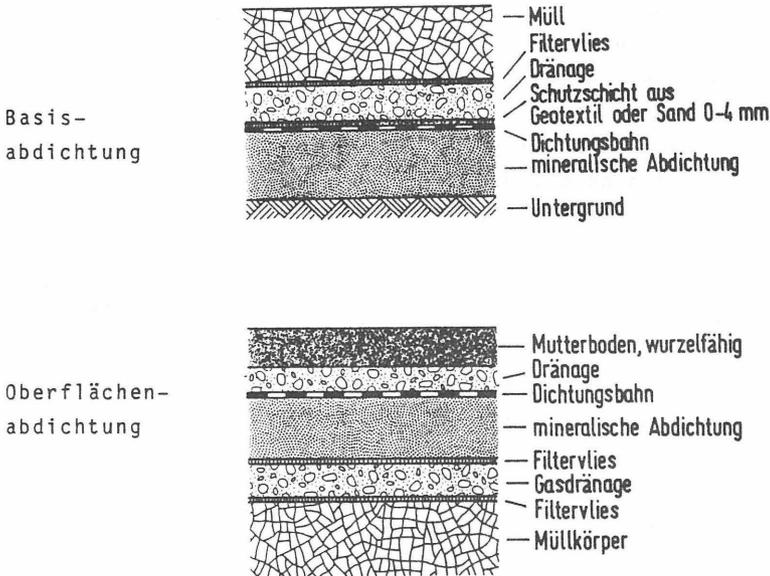


Bild 1: Kombinationsabdichtungen an Deponiebasis und Oberfläche

Gemeinsam ist beiden, daß die verwendete Kunststoffdichtungsbahn jeweils an der Unterseite im Kontakt mit einem mineralischen Abdichtungsmaterial steht, während auf der Oberfläche im allgemeinen eine Schutz- und Dränageschicht aus nichtbindigem Filtermaterial ausgeführt wird.

2.2 Beanspruchungen und Anforderungen an die Deponieabdichtungen

2.2.1 Kunststoffdichtungsbahnen

Für die Bemessung von Kunststoffdichtungsbahnen in der Deponietechnik sind kurz- und langzeitige Beanspruchungen zu berücksichtigen. Diese lassen sich generell in physikalische, chemische und biologische Beanspruchungen unterteilen.

Entsprechend der Richtlinie "Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen" (LANDESAMT FÜR WASSER U. ABFALL NRW, [1]) sind folgende Beanspruchungen zu nennen:

Kurzzeitige Beanspruchungen

- punkt- und linienförmige Druckbeanspruchungen, z.B durch Befahren während des Einbaus der Schutzschicht
- punktförmig und flächig angreifende Zugkräfte durch Wind- einwirkung bei freiliegenden Böschungen
- Angriffe durch Nagetiere und Pflanzen
- Temperatur und UV-Strahlung.

Langfristige Beanspruchungen

- Eigengewicht der Dichtungsbahn auf Böschungen
- Müllauflasten auf der Deponiebasisabdichtung im Sohl- und Böschungsbereich
- Verformungen infolge von Setzungsunterschieden
- Verformungen durch Temperaturunterschiede, vornehmlich bei nicht abgedeckten Bereichen
- chemische Beanspruchungen aus Sickerwässern und Deponiegasen
- biologische Beanspruchung durch Mikroorganismen.

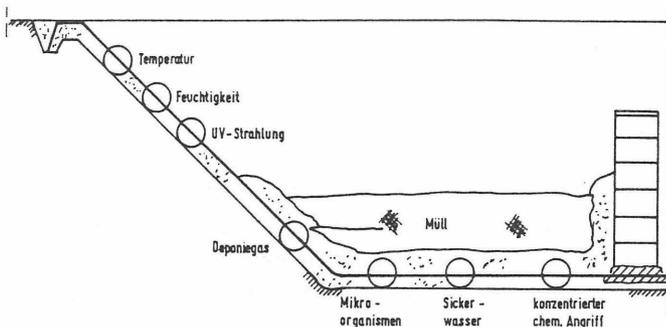


Bild 2: Mögliche Beanspruchungen von Dichtungsbahnen bei einer Deponiebasisabdichtung
(nach KNIPPSCHILD 1985, [2])

Entsprechend den aufgeführten Beanspruchungen werden an die Kunststoffdichtungsbahnen folgende Mindestanforderungen gestellt (nach KNIPPSCHILD 1985, [2]):

- Die Mindestdicke sollte 2,0 mm betragen.
- Die aufnehmbare Zugkraft bei einer Verformung von 5 % soll mindestens 400 N / 50 mm Bahnbreite erreichen.
- Die mehrachsige Bruchdehnung im Berstdruckversuch soll mind. 10 % betragen.
- Als Maß für die mechanische Durchschlagsfestigkeit wird eine Mindestfallhöhe eines genormten Fallkegels von 0,75 m gefordert, bis zu der die Dichtungsbahn nicht durchstoßen wird.
- Als Maß für den Widerstand gegen Weiterreißen wird eine Weiterreißkraft von min. 200 N gefordert.
- Als ausreichender Widerstand gegen punktförmige Druckbeanspruchungen eines genormten Druckkegels wird eine Durchdrückkraft von 1500 N gefordert.
- Chemische und biologische Beanspruchungen sowie Widerstandsfähigkeit gegen besondere Beanspruchungen ist durch Versuche nachzuweisen.

Anhand einiger Beispielrechnungen und Darstellungen zeigt KNIPPSCHILD (1985, [2]) auf, daß viele der auftretenden Druck- und Zugbeanspruchungen durch die heute eingesetzten HDPE (High Density Polyethylen)-Kunststoffdichtungsbahnen im allgemeinen durch die Mindestanforderungen abgedeckt werden.

Für den Fall, daß durch die Auflasten aus der Deponie aufgrund geringerer Reibung zum Untergrund als zu den Abdeckschichten Zugkräfte in der Dichtungsbahn entstehen, werden jedoch unzulässige Grenzen erreicht. Somit wäre in diesem Fall eine langfristige, unzulässige Dauerzugbeanspruchung der Dichtungsbahn gegeben. Um diese Beanspruchung vermeiden zu können, ist die Kenntnis des Reibungsverhaltens zwischen den Abdeckmaterialien an der Oberseite und der mineralischen Abdichtungsschicht an der Dichtungsbahnunterseite von entscheidender Bedeutung für Bemessung und Ausführung eines Kombinationsabdichtungssystems auf Böschungen. In Kapitel 2.3 wird daher die Bedeutung des Reibungsverhaltens für die Standsicherheit allgemein und für die Beanspruchung der Dichtungsbahn im besonderen erläutert.

2.2.2 Mineralische Abdichtungen

Im mineralischen Dichtungsmaterial sollte der Anteil an Feinteilen = 0,002 mm mindestens 20 M. % betragen und dieser zu mehr als der Hälfte aus Tonmineralien bestehen. Das Material sollte in der Lage sein, Untergrundverformungen bruchlos (plastisch) folgen zu können. Es muß homogen sein und einen gleichmäßigen Einbauwassergehalt besitzen (DRESCHER 1988, [3]). Für den Einsatz als mineralische Dichtungsmaterialien werden aufgrund dieser Forderung bevorzugt örtlich anstehende natürliche Ton- und Schluffvorkommen oder gemischtkörnige Materialien verwendet, die den genannten Eigenschaften entsprechen. Durch Zugabe von Bentoniten können die Eigenschaften gegebenenfalls verbessert werden. Der Einbau der Dichtungsschicht erfolgt lagenweise in einer Schichtstärke von ca. 30 cm. Bisher wurde i.a. eine Gesamtstärke der Dichtungsschicht von 0,6 - 1,0 m gefordert. Neuere Forderungen zielen auf eine Gesamtstärke von mind. 1,50 m (DRESCHER, 1988, [3]).

Um eine möglichst plastische und homogene Dichtungsschicht mit geringer Durchlässigkeit zu erhalten, wird der Einbau des Materials mit mindestens 95 % Proctordichte nach DIN 18127 auf dem nassen Ast der Proctorkurve verlangt. Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Proctordichte und Durchlässigkeit.

Die erforderlichen Einbaukennwerte sind in einer Eignungsprüfung des Dichtungsmaterials festzulegen. Neben der im Labor durchzuführenden Eignungsprüfung ist eine Probeverdichtung auf der Baustelle erforderlich, um Material- und Geräteeignung zu kontrollieren. Während der Bauausführung ist nur durch vielfältige Kontrollen der bodenmechanischen Eigenschaften des einzubauenden Dichtungsmaterials eine optimale Herstellung einer einwandfreien Dichtungsschicht zu gewährleisten. In einer ständigen Güteüberwachung, die in Eigen- und Fremdüberwachung durchzuführen ist, sind mindestens folgende Qualitätsmerkmale des Dichtungsmaterials zu prüfen:

Einbauwassergehalt,
Einbaudichte,
Kornverteilung,
Durchlässigkeit.

Fertiggestellte Bereiche sollten umgehend vor äußeren Witterungseinflüssen geschützt werden, im Sommer vor Austrocknung und dem damit verbundenen Schrumpfen des Dichtungsmaterials sowie im Herbst vor Niederschlägen und damit verbundenen Aufweichungen und Erosion.

Weitere Einzelheiten sind den einschlägigen Richtlinien und Merkblättern zu entnehmen (siehe Literaturverzeichnis).

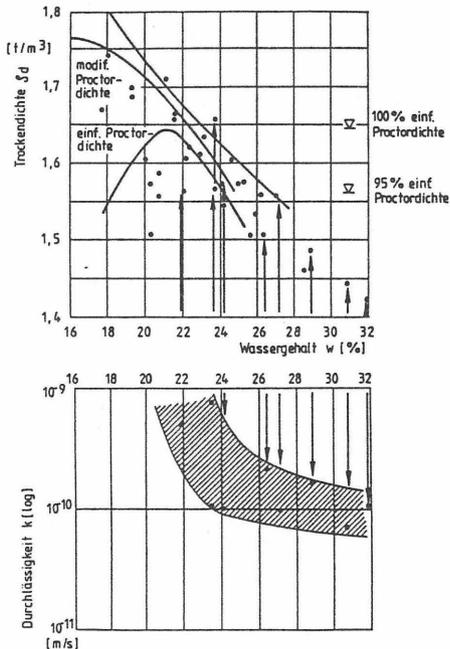


Bild 3: Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Proctordichte (REUTER 1985, [4])

2.3 Standsicherheitsbetrachtungen

2.3.1 Erforderliche Nachweise

Unter dem Begriff Standsicherheit wird bei der Anlage von Deponien im allgemeinen die Sicherheit gegen Abrutschen des gesamten Deponiekörpers bzw. einzelner Böschungen der Deponie auf möglichen Gleitflächen verstanden.

Um einen dauerhaften Abdichtungserfolg der Kombinationsabdichtung gewährleisten zu können, sind für die verschiedenen Bau- und Betriebsphasen der Deponie mehrere Standsicherheitsnachweise zu erbringen. Zunächst ist die Standsicherheit der im anstehenden Untergrund zu profilierenden Böschungen nachzuweisen. Für diese Nachweise stehen die bekannten Verfahren der DIN 4084 'Standsicherheitsberechnungen von Böschungen' zur Verfügung. Bei den im Deponiebau üblichen Böschungsneigungen von 1 : 1,5 bis 1 : 4 kann die Sicherheit der äußeren Böschungen i. a. gewährleistet werden.

Bild 4 zeigt beispielhaft einen zu untersuchenden möglichen Gleitkreis für eine Standsicherheitsuntersuchung der äußeren Böschung.

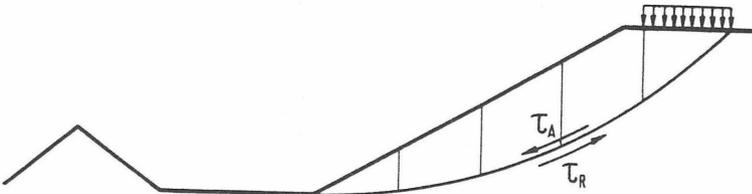


Bild 4: Möglicher Gleitkreis für den Standsicherheitsnachweis der äußeren Deponieböschung nach DIN 4084

Für die Bauphase der Kombinationsabdichtung aus mineralischem Abdichtungsmaterial, HDPE – Kunststoffdichtungsbahn und darauf befindlichem Flächenfilter aus nichtbindigen Materialien sind folgende Nachweise zu erbringen:

- Ein Abgleiten des Filtermaterials von der Dichtungsbahn darf nicht stattfinden.
- Die Dichtungsbahn selbst darf nicht zusammen mit dem Filtermaterial von der Böschung rutschen.
- Das evtl. als Schutzschicht auf der Dichtungsbahn aufgebraachte Geotextil darf nicht mit dem Drainagematerial abgleiten und durch Zugspannungen überbeansprucht werden.
- Das mineralische Abdichtungsmaterial selbst muß auf der Böschung standsicher sein.
- Zusätzlich muß gewährleistet sein, daß keine dauerhaften Zugspannungen in die Dichtungsbahn eingeleitet werden.

Zu untersuchende Gleitkörper I, II und III und ebene Gleitflächen, auf denen ein Abrutschen des Filtermaterials eintreten könnte, sind in Bild 5 dargestellt.

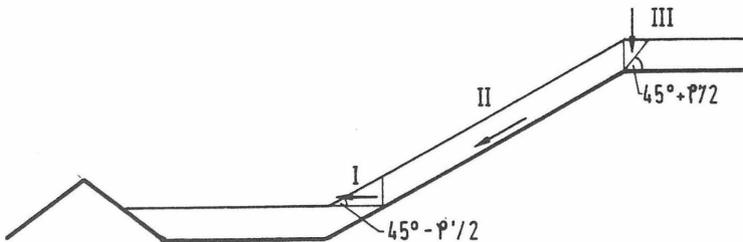


Bild 5: Mögliche Gleitflächen und Gleitkörper I -III in einer Kombinationsabdichtung auf Böschungen an der Basis der Deponie

Nach Abdeckung der Deponie mit einer Oberflächenabdeckung sind die für die Kombinationsabdichtung an der Basis geltenden Nachweise ebenfalls für die Oberflächenabdeckung zu erbringen. Bild 6 zeigt mögliche Gleitflächen und Gleitkörper I, II und III innerhalb einer Oberflächenabdeckung.

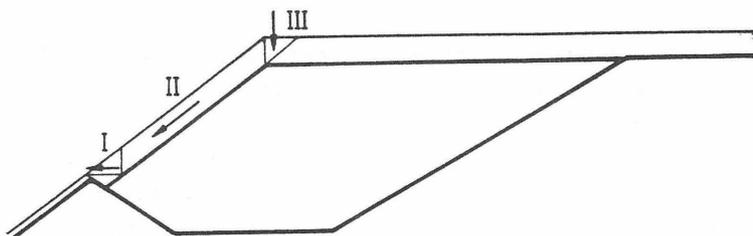


Bild 6 : Mögliche Gleitflächen u. Gleitkörper innerhalb einer Oberflächenabdeckung

Für Bauzustände nach und während der Betriebsphase der Deponie ist zu gewährleisten, daß ein Gleiten des gesamten Deponiekörpers auf den potentiellen Gleitflächen der Kombinationsabdichtung nicht eintritt. Mögliche Gleitflächen und Gleitkörper I, II und III innerhalb einer Hangdeponie sind in Bild 7 dargestellt.

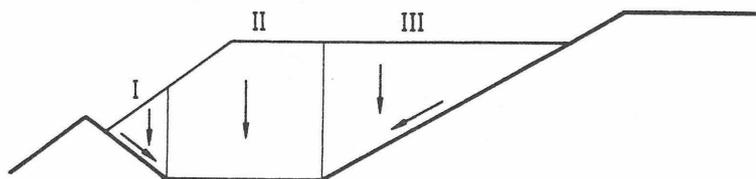


Bild 7: Mögliche Gleitkörper und Gleitflächen für den Standsicherheitsnachweis der gesamten Deponie

In allen Fällen spielt das Reibungsverhalten zwischen der Kunststoffdichtungsbahn und verschiedenen Bodenmaterialien eine entscheidende Rolle für die Standsicherheit der Deponie. Die Standsicherheit ist stets dann gegeben, wenn die Summe der antreibenden Kräfte kleiner ist als die Summe der rückhaltenden Kräfte.

$$\text{Standsicherheit } \mu = \frac{\text{Summe rückhaltender Kräfte}}{\text{Summe antreibender Kräfte}}$$

Allgemeine Standsicherheitsdefinition

In Bild 8 sind die in einem Ausschnitt einer Kombinationsabdichtung angreifenden Kräfte dargestellt.

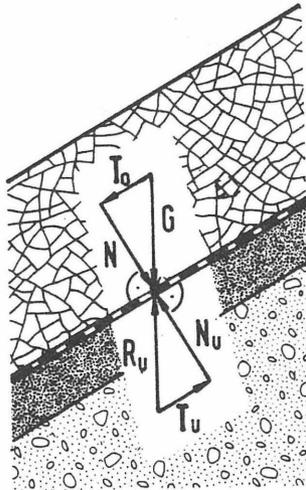


Bild 8: Schematische Darstellung der in einem Ausschnitt einer Kombinationsabdichtung angreifenden Kräfte

Eine vertikale Gewichtskraft G setzt sich vektoriell zusammen aus den Komponenten N und T_0 . Dabei wirkt N normal zur Dichtungsbahn, während T_0 parallel zur Dichtungsbahn angreift. Zugspannungen werden genau dann vermieden, wenn die durch Reibungskräfte auf die Dichtungsbahn wirkende Kraft T_0 kleiner oder gleich der unterhalb der Dichtungsbahn wirkenden Reibungskraft T_u zwischen Dichtungsbahn und Untergrund ist. Daher besteht die Forderung, daß die Reibungskräfte $T_0 \leq T_u$ sein müssen. Nach KNIPPSCHILD (1985, [2]) reichen schon geringe Differenzen zwischen T_0 und T_u aus, um unzulässige Zugspannungen in der Dichtungsbahn zu erhalten.

Bild 9 zeigt den für diesen Fall geltenden Berechnungsansatz nach KNIPPSCHILD (1985, [2]).

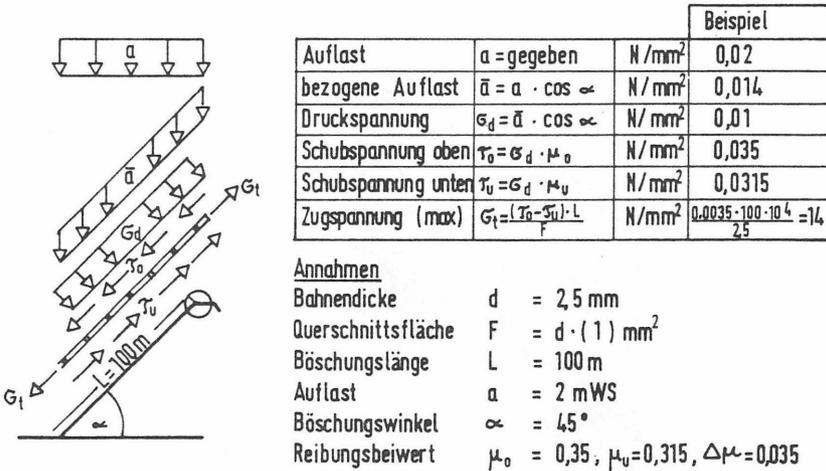


Bild 9: Nachweis von Zugspannungen in der Dichtungsbahn (KNIPPSCHILD 1985, [2])

Speziell für den Nachweis der Standsicherheit auf vorgegebenen Gleitflächen bietet sich das Näherungsverfahren von STRECK (aus SIMONS, 1984, [5]) an.

Bild 10 zeigt die graphische Ermittlung der angreifenden und rückhaltenden Kräfte nach STRECK (aus SIMONS 1984, [5]).

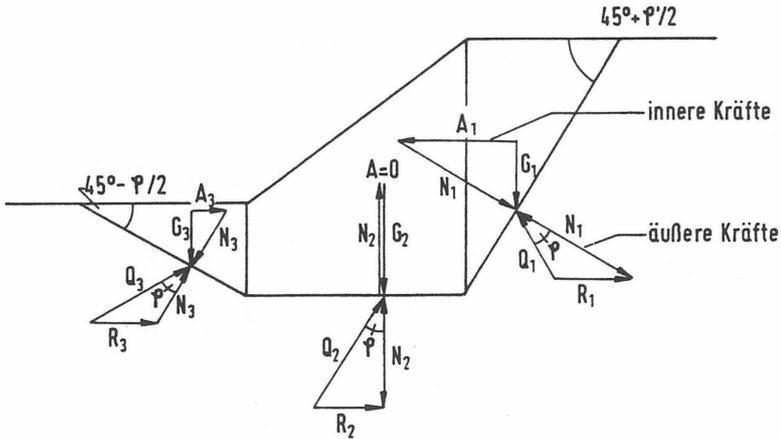


Bild 10: Näherungsverfahren nach STRECK (aus [5])

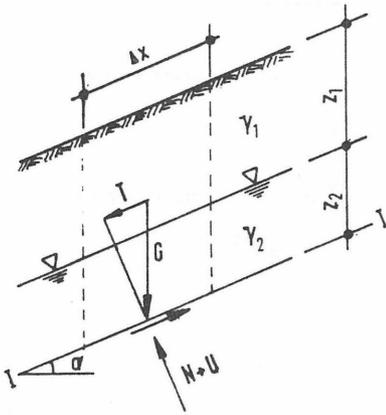
Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Gleitsicherheit besteht im Vergleich der in der Gleitfläche wirkenden hangparallelen Schubkräfte T mit den in der Gleitfläche maximal übertragbaren Schubkräften T_f .

Nach GÜNTER/FOIK (1988, [6]) ergibt sich die Sicherheit gegen Abgleiten der Böschung unter Berücksichtigung einer in der Drainage wirkenden Strömungskraft U , die durch das hangabwärts fließende Drainagewasser ausgelöst wird, nach folgender Formel.

$$\eta = \frac{T_f}{T + U}$$

Sicherheitsdefinition nach GÜNTER/FOIK 1988, [6] (siehe auch Bild 11)

Für jede einzelne Gleitfläche kann die zahlenmäßige Berechnung der Sicherheit nach den in den nachfolgenden Formeln dargestellten Zusammenhängen berechnet werden. Die Sicherheit ist dabei abhängig vom Böschungswinkel α sowie von den Scherparametern des Bodens φ' und c' und den Scherparametern zwischen Dichtungsbahn und Boden δ' und a' .



$$G = z_1 \cdot \Delta X \cdot \gamma_1 + z_2 \cdot \Delta X \cdot \gamma_2$$

$$U = u \cdot \frac{\Delta X}{\cos \alpha}$$

u = Wasserdruck in der Fuge I-I

$$T_f = N \cdot \tan \varphi' + c' \cdot \frac{\Delta X}{\cos \alpha}$$

$$T_f = N \cdot \tan \delta' + a' \cdot \frac{\Delta X}{\cos \alpha}$$

$$T = G \cdot \sin \alpha$$

$$N = G \cdot \cos \alpha - U$$

Sicherheitsdefinition: $\eta = \frac{T_f}{T}$

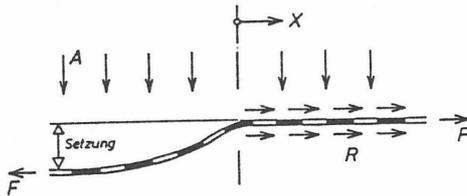
$$\eta = \frac{\frac{c'}{\cos^2 \alpha} + [(z_1 \cdot \gamma_1 + z_2 \cdot \gamma_2) - \frac{U}{\cos^2 \alpha}] \cdot \tan \varphi'}{(z_1 \cdot \gamma_1 + z_2 \cdot \gamma_2) \cdot \tan \alpha}$$

$$\eta = \frac{\frac{a'}{\cos^2 \alpha} + [(z_1 \cdot \gamma_1 + z_2 \cdot \gamma_2) - \frac{U}{\cos^2 \alpha}] \cdot \tan \delta'}{(z_1 \cdot \gamma_1 + z_2 \cdot \gamma_2) \cdot \tan \alpha}$$

Bild 11: Berechnung der Gleitsicherheit einer hangparallelen Böschung (Nach GÜNTER/FOIK 1988, [6])

Um das Kraftübertragungsverhalten zwischen dem Filtermaterial oberhalb und dem Abdichtungsmaterial unterhalb der Dichtungsbahn zu erhöhen, können beidseitig oberflächenstrukturierte Dichtungsbahnen eingesetzt werden. Die Oberflächenstrukturen sollen eine bessere Verzahnung der angrenzenden Materialien mit der Dichtungsbahn und somit eine größere Kraftübertragung gewährleisten. Diese für die Erhöhung der Standsicherheit dienliche Verzahnung steht jedoch einer anderen für die Dauerhaftigkeit der Abdichtung notwendigen Forderung entgegen. Um gerade an der Deponiebasis die durch die hohen Auflasten aus dem Müllkörper entstehenden Setzungen und daraus resultierende Verformungen rißfrei und ohne dauerhafte Zugspannungen ausgleichen zu können, muß die Dichtungsbahn möglichst großflächig diesen Setzungen durch ihr hohes Dehnvermögen folgen und sich daraus ergebende Zugspannungen über ihr Relaktionsvermögen abbauen können.

Eine enge Verzahnung mit den umgebenden Materialien behindert jedoch großflächige, mehraxiale Dehnungen der Dichtungsbahn und könnte zu unerwünschten Spannungsspitzen in der Dichtungsbahn führen. In Bild 12 ist ein Modell zur Abschätzung der freien verformbaren Länge bei Setzungsunterschieden dargestellt.



Reibkräfte: $\Sigma R = 2 (A \cdot \alpha) \cdot X$

mit A = Auflasten
 α = Kraftübertragungsfaktor = $\mu \cdot f$
 μ = Reibungsbeiwert
 f = Formschlulßbeiwert
 X = verformbare Länge

Zugkraft in der Dichtungsbahn: $F_{max} = \sigma \cdot d$

mit σ = Festigkeit der Dichtungsbahn
 d = Dicke der Dichtungsbahn

$$F_{max} = \Sigma R$$

$$X = \frac{\sigma \cdot d}{2A \cdot \alpha}$$

Bild 12: Modell zur Abschätzung der frei verformbaren Länge bei Setzungsunterschieden (KNIPPSCHILD 1979, [7])

2.4 Ermittlung der Scherfestigkeit von Böden und zwischen Böden und Kunststoffdichtungsbahnen

2.4.1 Physikalische Grundlagen

Das Auftreten von Reibungskräften zwischen zwei festen Materialien ist physikalisch auf deren Oberflächenbeschaffenheit, die in keinem Fall vollständig glatt ist, sondern immer ein gewisse Rauigkeit aufweist, zurückzuführen.

Werden zwei sich einander berührende Flächen gegeneinander verschoben, müssen die Verzahnungen, die durch die Rauigkeit der Oberflächen bestehen, durch Kraftwirkung überwunden werden. Dieser Vorgang wird im allgemeinen als Abscheren bezeichnet; entsprechend wird in Scherflächen, Scherkräfte und Scherbeanspruchungen unterschieden.

Nach ZIRPKE, KUMMER (1980, [8], siehe Bild 13) ist ein Abscheren nur möglich, wenn durch die angreifenden Scherkräfte

- die Verzahnungen aufbrechen,
- sich eine Scherfläche verformen läßt,
- einer der reibungsbeanspruchten Körper durch Ausweichen die Verzahnung überwinden kann.

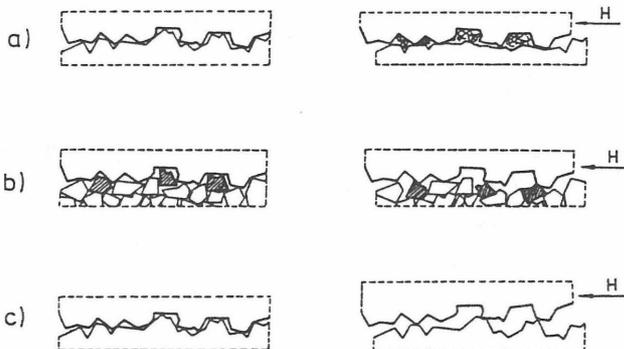


Bild 13: Möglichkeiten zur Überwindung der Verzahnung bei Scherbeanspruchungen (ZIRPKE, KUMMER, 1980, [8])

Ausschlaggebend für die auftretenden Reibungswiderstände in den Scherflächen sind die Materialeigenschaften der sich jeweils berührenden Materialien.

Die Oberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Materialien und ihr Einfluß auf das Reibungsverhalten läßt sich nicht exakt und allgemeingültig beschreiben, weil der Zustand der Scherflächen beim Übergang vom Gleichgewichtszustand (Ruhe-
lage) in den Bewegungszustand (Gleiten) unter einer Scherbeanspruchung nicht eindeutig vorausbestimmt werden kann. Aus diesem Grunde ist man zur Ermittlung des Reibungswiderstandes auf Versuche angewiesen, mit deren Hilfe die Wirkung der Oberflächenreibung bestimmt werden kann (BÖRNER 1973, [9]).

Durch andere Stoffe, die in der Scherfläche eingelagert sind oder werden, wird das Reibungsverhalten beeinflußt. Z.B. können tragende Flüssigkeitsschichten dazu führen, daß sich die Oberflächen nicht mehr direkt berühren und die Reibung dadurch stark herabgesetzt wird. Es handelt sich dann um "Flüssigkeitsreibung", die den Gesetzmäßigkeiten der Hydromechanik unterliegt. Mischreibung entsteht, wenn durch die Flüssigkeit die Scherflächen der Materialien nicht vollständig voneinander getrennt werden und die festen Bestandteile noch einen Einfluß auf das Reibungsverhalten ausüben. Auch in diesem Fall tritt eine Verminderung der Reibungskräfte ein (BÖRNER 1973, [9]).

Das Bild 14 zeigt die Kräfteverteilung an einem ruhenden Körper, der von einer resultierenden Kraft P unter dem Neigungswinkel φ' belastet wird.

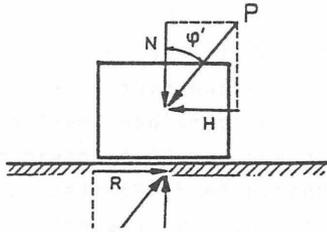


Bild 14: Kräfteverteilung an einem ruhenden Körper, der von einer aus Normalkraft N und Horizontalkraft H resultierenden Kraft P unter dem Neigungswinkel φ' belastet wird

Der größtmögliche Winkel unter dem die resultierende Kraft P angreifen darf, ohne daß der Körper in Bewegung gerät, ist von der größtmöglichen Reibungskraft abhängig. Es gilt folgende Beziehung:

$$R = N * \tan \varphi'$$

R = Haftreibungskraft

N = Normalkraftanteil der äußeren Kraft P

H = Horizontalkraftanteil der äußeren Kraft P

φ' = Angriffswinkel der äußeren Kraft P (Reibungswinkel)

$\tan \varphi' = \mu$ = Haftreibungszahl (Reibungsbeiwert)

(siehe Bild 14)

Für den Reibungsbeiwert μ gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

μ ist unabhängig von der Normalkraft N ,
der Berührungsfläche und
der Verschiebungsgeschwindigkeit

μ ist abhängig von der Beschaffenheit
der Kontaktflächen und dem Material.

2.4.2 Scherfestigkeit von Böden

Der größte Widerstand, den ein Boden einer Scherbeanspruchung entgegenbringen kann, wird in der Bodenmechanik als Scherfestigkeit τ_F bezeichnet. Die Bestimmung der Scherfestigkeit von Böden ist in DIN 18137 geregelt.

Grundsätzlich ist die Scherfestigkeit eines Bodens von der wirksamen Normalspannung σ_N' , der Beschaffenheit der Bodenteilchen und der Bodenzusammensetzung abhängig. Nach dem Erreichen der maximalen Scherfestigkeit nimmt der Scherwiderstand des Bodens bis zum Erreichen der Gleitfestigkeit bzw. Restscherfestigkeit ab (KEZDI 1964, [10]). Zwei typische Scherverschiebungskurven verschiedener Bodenarten sind in Bild 15 dargestellt.

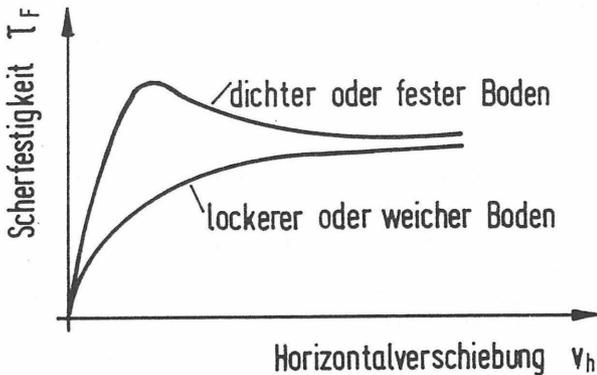


Bild 15: Scherspannungsverschiebungsdiagramm verschiedener Böden (nach SIMONS 1984, [5])

Zur Auswertung eines kompletten Scherversuches werden im allgemeinen drei Teilversuche mit jeweils unterschiedlicher, wirksamer Normalspannung σ_N' durchgeführt. Die wirksame Normalspannung ist nach DIN 18137 die auf das Korngerüst wirkende Spannung, d.h. die gesamte Normalspannung abzüglich des Porenwasserdruckes u .

$$\sigma_N' = \sigma_N - u$$

Die Ergebnisse werden in einem Scherspannungsverschiebungsdiagramm sowie einem Scherspannungs-/ Normalspannungsdiagramm (Tau/Sigma Diagramm) dargestellt. Aus diesem Diagramm werden die Scherparameter des Bodens der Reibungswinkel φ' und der Kohäsionsanteil c' ermittelt (siehe Bild 16).

Es gilt die MOHR COULOMBSCHE Beziehung

$$\tau_F = \sigma_N' * \tan \varphi' + c'$$

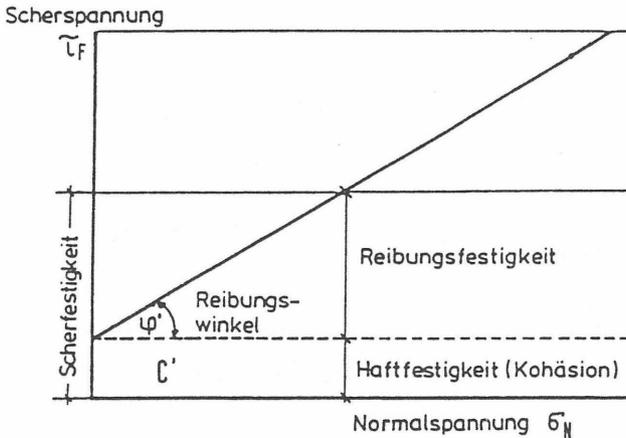


Bild 16: Scherspannungs-/ Normalspannungsdiagramm eines Scherversuches (nach SIMONS 1984, [5])

2.4.2.1 Einflüsse auf das Reibungsverhalten von nichtbindigen Böden

In der Bodenmechanik werden unter nichtbindigen Böden Sande, Kiese und Sand-Kiesgemische mit einem Anteil von kleiner 5 M. % der Korngröße $\leq 0,063$ mm verstanden. Die Scherfestigkeit der nichtbindigen Böden wurde bereits hinreichend untersucht, darum werden die Einflußparameter auf die Scherfestigkeit hier nur der Vollständigkeit halber zusammengestellt.

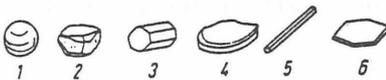
Nach KEZDI (1964, [10]), TERZAGHI/PECK (1961, [11]), und anderen Autoren [13], [16], [23], [30] setzt sich die Scherfestigkeit nichtbindiger Böden im wesentlichen aus folgenden Anteilen zusammen:

1. Reibungskräfte durch Gleiten und Makroreibung:
An den Kontaktflächen der einzelnen Körner entstehen Reibungskräfte, die der Verschiebung und dem Gleiten der Körner entgegen wirken.
2. Reibungskräfte durch Kornumlagerung:
Aufgrund der Verzahnung der Körner untereinander werden Reibungskräfte beim Verschieben und Verdrehen der Körner geweckt.
3. Reibungskräfte durch Auflockerungsbehinderung:
Während des Abschervorgangs müssen die Körner teilweise gegen die Auflast angehoben werden, um die Verzahnungen zu überwinden. Die Folge ist eine Volumenvergrößerung der Probe (Dilatation).

Einflüsse von Korngröße, -form und -rauigkeit

Je nach Entstehungsart der nichtbindigen Böden besitzen die Körner verschiedene Formen und Rauigkeit. Nach SMOLTCZYK (1980, [14]) werden folgende Formen und Rauigkeiten unterschieden:

a) bei der Kornform,



1. kugelig, 2. gedrungen,
3. prismatisch, 4. plattig,
5. stäbchenförmig, 6. plättchenförmig

b) bei der Kornrauigkeit



1. scharfkantig, 2. kantig,
3. rundkantig, 4. gerundet, 5. glatt

Bild 17: Kornformen und -rauigkeiten nichtbindiger Böden
(aus SMOLTCZYK, 1980, [14])

Die Kornform, Korngröße und die Kornrauigkeit beeinflussen die Reibungswiderstände im Boden. Mit zunehmender Größe und Rauigkeit der Körner nimmt die Scherfestigkeit der nichtbindigen Böden zu (TERZAGHI/PECK 1948, aus [15]).

Erdstoff	Runde Körner, gleichförmige Kornverteilung	Eckige Körner, ungleichförmige Kornverteilung
lockerer Sand	28,5°	34°
dichter Sand	35°	46°

Bild 18: Grenzwerte des Reibungswinkels von Sand nach
TERZAGHI/PECK (1948, aus [15])

Einfluß der Lagerungsdichte

In Bild 19 ist das unterschiedliche Scherverhalten zwischen locker und dicht gelagertem Sand dargestellt. Nach KEZDI (1969, [12]) lockert sich ein dichtgelagerter Sand während des Abschervvorgangs auf, während ein lockergelagerter Sand verdichtet wird. Mit zunehmender Verdichtung bzw. Auflockerung ändert sich während des Versuches die Porenzahl e . Bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen stellt sich mit zunehmender Horizontalverschiebung in beiden Fällen die Restscherfestigkeit des Bodens ein und die Porenzahl e nimmt einen konstanten Wert, die kritische Porenzahl e_{kr} , ein.

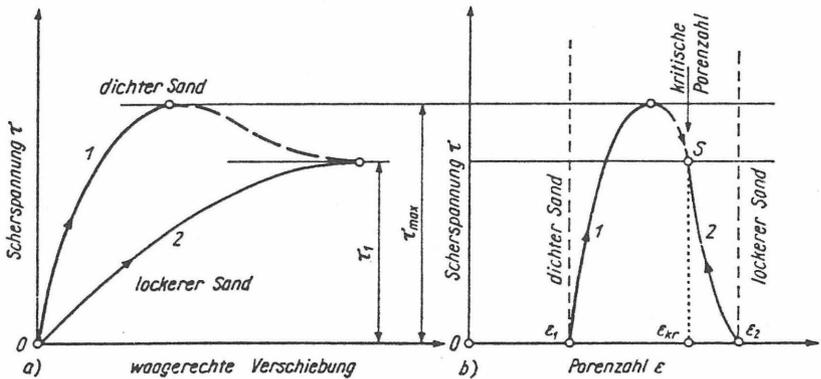


Bild 19: Scherverhalten von locker und dicht gelagertem Sand (KEZDI 1969, [10])

CAQUOT/KERISEL (1967, [16]) geben für gleichförmige Sande mit einem Ungleichförmigkeitsgrad $U < 2$ folgenden näherungsweise Zusammenhang an.

$$\tan \varphi' = 0,55 / e$$

Einfluß des Wassergehaltes

Dem Wassergehalt der nichtbindigen Böden kommt nach KEZDI (1969, [10]) und CAQUOT (1967, [16]) keine wesentliche Bedeutung zu. Versuche an trockenen und feuchten Sanden ergaben für die feuchten Sande einen maximal um 1 bis 2 Grad geringeren Reibungswinkel.

Einfluß der Ungleichförmigkeit

Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Reibungswinkel und der Ungleichförmigkeit der nichtbindigen Böden besteht nicht. Es finden sich jedoch verschiedene Ansätze, in denen die Kornverteilung der nichtbindigen Böden berücksichtigt wird.

Nach MOGAMI/YOSHIKOSHI (1968, [17]) gilt:

$$\sin \varphi' = k / (1 + e)$$

mit $k = 1,5 - 0,475 \log U$ für natürliche Böden

$k = 1,1 - 0,35 \log U$ für gebrochenes Material

U = Ungleichförmigkeitszahl

e = Porenzahl

Einen anderen Ansatz, der die Kornverteilung des Bodens berücksichtigt, gibt TERFARRA (1975, [18]) an.

$$\cot \varphi' = a * e_a + b$$

mit $a = 2,105 + 0,097 d_{85}/d_{15}$

$b = 0,845 - 0,398 a$

e_a = Anfangsporenzahl

d_{85} = Korndurchmesser bei 85 % Massenanteile

d_{15} = Korndurchmesser bei 15 % Massenanteile

Der Reibungswinkel nimmt danach mit der Verhältniszahl d_{85} / d_{15} ab.

Ein empirischer Ansatz von LUNDGREN (1960, [19]) berücksichtigt mehrere Einflußgrößen auf die Scherfestigkeit nichtbindiger Böden. Danach gilt folgender Zusammenhang:

$$\phi' = 36 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 \quad [\text{Grad}]$$

mit den Faktoren $p_1 - p_4$ werden berücksichtigt:

Kornform:	$p_1 =$	+1	scharfe Kornform
		0	mittlere Kornform
		-3	abgerundete Kornform
		-6	sehr runde Kornform
Korngröße:	$p_2 =$	0	Sand
		+1	feiner Kies
		+3	mittel bis grober Kies
Kornverteilung:	$p_3 =$	-3	enggestufter Sand
		0	mittlere Verteilung
		+3	gut verteilter Sand
Lagerungsdichte:	$p_4 =$	-6	lockerste Lagerung
		0	mittlere Lagerung
		+6	dichteste Lagerung

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Lagerungsdichte, neben der Kornform und -rauigkeit, den größten Einfluß auf die Scherfestigkeit der nichtbindigen Böden hat. Die Ungleichförmigkeit der Böden beeinflusst die Dichte der Böden. Mit zunehmender Ungleichförmigkeit werden die Zwischenräume zwischen den größeren Körnern zunehmend von kleineren Kornfraktionen ausgefüllt und damit die Dichte und somit auch die Widerstandskräfte im nichtbindigen Haufwerksgefüge erhöht (Siehe auch JÄHNKE 1968 [20], SCHULZE 1968, [21], PETERMANN, 1939 [22], TURNBULL 1948, [24] und CASAGRANDE 1939, [23]).

2.4.2.2 Einflüsse auf das Reibungsverhalten bindiger Böden

Als bindige Böden werden nach DIN 4022 Böden bezeichnet, deren Hauptanteil aus der Kornfraktion $< 0,063$ mm besteht, oder gemischtkörnige Böden, deren bodenmechanische Eigenschaften vorwiegend durch den Feinkornanteil $< 0,063$ mm geprägt werden. Bei den Korngrößen unter $0,063$ mm wird noch in Schluff und Ton unterschieden, wobei unter Ton Korngrößen $< 0,002$ mm verstanden werden. Einen entscheidenden Einfluß auf die bodenmechanischen Eigenschaften der bindigen Böden hat der Anteil der im Boden enthaltenen Tonminerale und deren mineralogische Struktur. Zur Einteilung der bindigen Böden wird neben der Kornverteilung vor allen Dingen ihr plastisches Verhalten, das ausschließlich durch die Tonminerale geprägt wird, herangezogen.

Nach DIN 18 122 werden die Wassergehalte an der Fließgrenze w_L und der Ausrollgrenze w_p als Konsistenzgrenzen bezeichnet und zur Beurteilung des plastischen Verhaltens bindiger Böden bestimmt. Die Differenz ergibt die Plastizitätszahl

$$I_p = w_L - w_p.$$

Die Konsistenz eines bindigen Bodens ist abhängig vom Wassergehalt w_N des Bodens und wird durch die Konsistenzzahl

$$I_c = (w_L - w_N) / I_p \text{ ausgedrückt.}$$

Bild 20 zeigt den Zusammenhang zwischen Konsistenz, Wassergehalt und Plastizität .

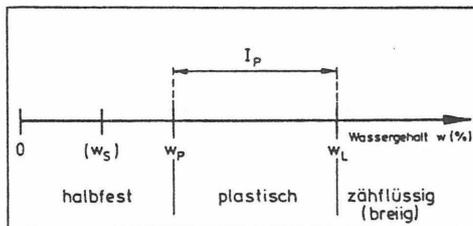


Bild 20: Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Konsistenz, und Plastizität

Die meisten der in den feinkörnigen Kornfraktionen vorkommenden Tonminerale können mineralogisch in drei Hauptgruppen eingeteilt werden: in Kaolinite, Illite und Montmorillonite. Die Minerale aller drei Gruppen haben eine blättrige, kristalline Struktur; ihre Oberflächenaktivität ist jedoch sehr unterschiedlich. Am wenigsten aktiv sind die Kaolinite, aktiver die Illite und bei weitem die aktivsten Minerale die Montmorillonite (TERZAGHI/PECK 1961, [15]). Bei den Kaoliniten bestehen die einzelnen Schichten der Tonminerale aus je einer Tetraeder- und einer Oktaederschicht. Durch Wasserstoffbrücken werden diese verhältnismäßig fest zusammengehalten, so daß der Schichtabstand durch Wasser nicht aufgeweitet werden kann. Austauschfähige Kationen liegen nur an den äußeren Basisflächen an. Bei den Illiten und Montmorilloniten sind die Kationen zwischen den einzelnen Schichten und an den äußeren Oberflächen gebunden. Die negativ geladenen Schichten werden vor allem elektrostatisch durch die Zwischenschichtkationen zusammengehalten. Mit abnehmender Ladungsdichte an der Oberfläche nimmt der Zusammenhalt zwischen den Schichten ab, und Wasser kann in den Zwischenschichtraum eintreten. Diese als innerkristalline Quellung bezeichnete Schichtaufweitung ist bei den niedrig geladenen Montmorilloniten am ausgeprägtesten und tritt bei den hochgeladenen Illiten nicht auf (G.LAGALY 1988, [26]).

Der Montmorillonit besteht aus einzelnen Lamellen, deren Oberflächen im allgemeinen negativ geladen sind. Durch Zwischenschichtkationen werden die negativen Ladungen kompensiert und die einzelnen Lamellen elektrostatisch und durch van der Waal'sche Massenanziehungskräfte zusammengehalten. Dadurch werden die Primärteilchen, bestehend aus einem Paket von ungefähr zehn Einzellamellen, zusammengefügt. Weitere Kationen befinden sich am Rand der Primärteilchen und fügen diese ihrerseits zu Mikroaggregaten zusammen. Bei Zunahme des Wassergehaltes lagert sich durch die Hydratation der Zwischenschichtkationen Wasser zwischen den einzelnen Lamellen an, und ihr Abstand vergrößert sich bei gleichzeitiger Abnahme der Anziehungskräfte (MÜLLER-VONMOOS, 1988, [25]).

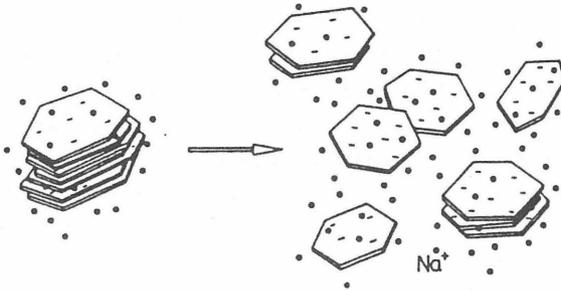


Bild 21: Zerfall von Tonmineralschichtpaketen in einzelne Lamellen bei Wasserzutritt
(aus MÜLLER-VONMOOS 1988, [25])

Dadurch erlangen die Mikroaggregate und einzelnen Lamellen mehr und mehr die Fähigkeit, gegeneinander zu gleiten (siehe Bild 21). Das Gefüge zeigt sich in einem plastischen Zustand, der in einen breiig, zähflüssigen Zustand übergeht, sobald der Wassergehalt weiter steigt (CAQUOT/KERISEL 1967, [16]). Dieser Vorgang ist weitestgehend reversibel, und die einzelnen Tonteilchen lagern sich bei der Abnahme des Wassergehaltes wieder zu mehr oder weniger dicken Schichtpaketen und Mikroaggregaten zusammen. Die Konsistenz wird zunehmend fester, die Plastizität nimmt ab (MÜLLER-VONMOOS 1988, [25]).

Nach KEZDI (1969, [12], siehe Bild 22) kann das Wasser in feinkörnigen Böden folgende Erscheinungsformen haben:

- Adsorbiertes Wasser, welches die Tonminerale umgibt und auch in das innere Kristallgitter eindringen kann. Wegen der hohen Oberflächenspannung (bis zu 2000 MN/m^2), der dieses Wasser unterliegt, verhält es sich praktisch wie ein fester Körper und ist nicht beweglich.
- Gebundenes Porenwasser, welches unter dem Einfluß der Kräfte der Ionenbindung steht, aber noch beweglich ist.
- Freies Porenwasser, welches frei beweglich ist und den bodenhydraulischen Gesetzen unterliegt.

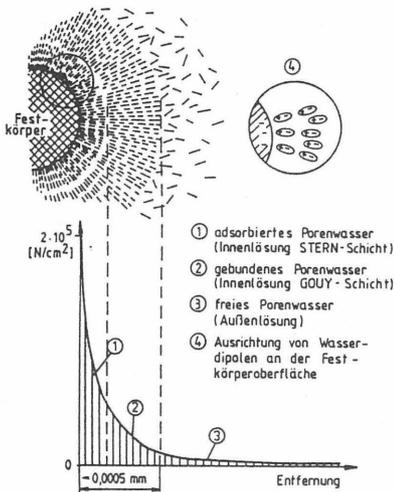


Bild 22: Bindungsstärke der Wasserdipole bei feinkörnigen Böden (nach KEZDI 1969, [12])

Mit zunehmender Entfernung von der Kornoberfläche feinkörniger Böden nimmt die Bindungsstärke der Wasserdipole stark ab.

Bei bindigen Böden ist die Menge des gebundenen, adsorbierten Wassers bedeutend größer als bei grobkörnigen Böden, und die Kapillarporen sind derart klein, daß die Haftspannungen einen großen Einfluß ausüben. Die Kohäsion der feinkörnigen Böden im festen und plastischen Zustand wird nach TERZAGHI/PECK (1961, [11]) nicht allein durch die molekularen Anziehungskräfte zwischen den Bodenteilchen an deren Berührungspunkten verursacht, sondern auch durch die Scherfestigkeit der adsorbierten Schichten. Mit Zunahme des Wassergehaltes nimmt die Kohäsion ab.

Wird ein wassergesättigter Boden belastet, so wird die Belastung zunächst vom Porenwasser aufgenommen. Es entsteht ein Porenwasserdruck. Unter der Belastung entweicht das Wasser aus dem Boden und die Belastung wird vom Korngerüst des Bodens aufgenommen, gleichzeitig nimmt der Porenwasserdruck ab. Dieser Vorgang wird in der Bodenmechanik als Konsolidation bezeichnet.

Die Porenwasserdrücke sind von der Belastungsgeschwindigkeit und von der Durchlässigkeit des Bodens abhängig. Bei nicht bindigen Böden treten Porenwasserdrücke unter Belastung nur sehr kurzfristig auf, da das Wasser sehr schnell aus dem Boden entweicht und somit die Belastung innerhalb kurzer Zeit vom Korngerüst aufgenommen wird. Bei der Ermittlung der wirksamen Scherparameter φ' und c' von bindigen Böden sind die Porenwasserdrücke zu berücksichtigen oder zu vermeiden. Um die wirksamen Scherparameter φ' und c' von Böden zu ermitteln, werden zwei Versuchsarten unterschieden.

- Konsolidierter, dräniertes Versuch (CD - Versuch):

Die Proben werden zunächst belastet und konsolidiert und anschließend derart langsam abgeschert, daß sich innerhalb der Probe kein Porenwasserdruck aufbaut.

- Konsolidierter, undränniertes Versuch (CU - Versuch):

Die Probe wird belastet, konsolidiert und anschließend abgeschert; die innerhalb der Probe auftretenden Porenwasserdrücke werden jedoch gemessen.

Neben der Art und dem Anteil der Tonmineralien, dem Wassergehalt, der Belastungsgeschwindigkeit und dem Konsolidierungszustand der bindigen Böden hat auch die Struktur der bindigen Böden einen Einfluß auf die Scherfestigkeit, wobei die Struktur der feinkörnigen Bodenteilchen durch äußere mechanische Verdichtungsenergie verändert werden kann. Versuche von LAMBE (1958, [27], siehe Bild 23) zeigen die Veränderung der Struktur eines Tones in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Verdichtungsenergie.

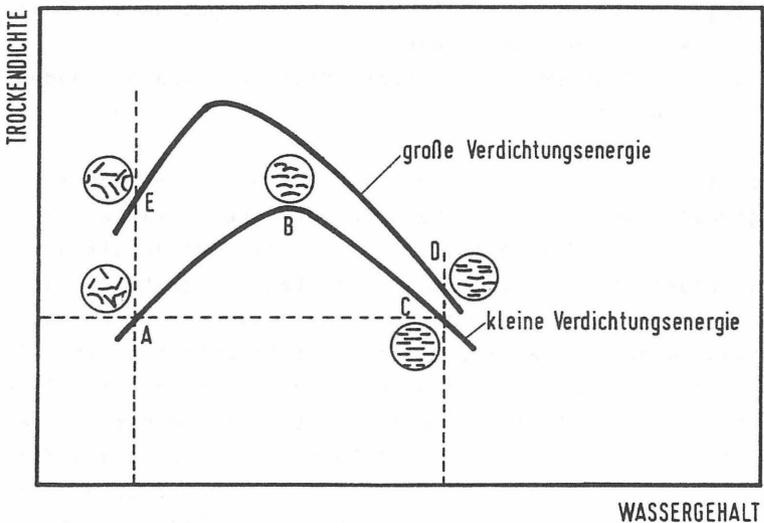


Bild 23: Einfluß der Verdichtung auf die Struktur von Ton
(Nach LAMBE 1958, [27])

2.4.3 Scherfestigkeit zwischen Böden, Kunststoffdichtungsbahnen und verschiedenen Baumaterialien

2.4.3.1 Allgemeines

Analog zur Ermittlung der Scherfestigkeit von Böden gilt für das Reibungsverhalten zwischen Dichtungsbahnen und Böden folgende Beziehung:

$$\tau_{DB} = \sigma'_N \cdot \tan \varphi' + a'$$

- mit τ_{DB} = Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden
 σ'_N = Wirksame Normalspannung
 φ' = Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden
 a' = Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden.

Da zwischen Dichtungsbahn und Boden bereits eine Scherfläche vorgegeben ist, sind direkte Scherversuche im Kastenschergerät als Untersuchungsmethode für das Reibungsverhalten zwischen Boden und Dichtungsbahn am besten geeignet. Die Scherfläche wird sich in der Kontaktfläche zwischen Boden und Dichtungsbahn einstellen, solange die Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn kleiner oder höchstens gleich der Scherfestigkeit des Bodens ist. Sollte der Haftungsverbund zwischen Dichtungsbahn und Boden fester sein als die Scherfestigkeit des Bodens wird sich die Scherfläche innerhalb des Bodens einstellen, und es wird im Scherversuch die Scherfestigkeit des Bodens ermittelt. Daher gilt:

$$\tau_{DB} \leq \tau_F$$

- mit τ_{DB} = Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden
 τ_F = Scherfestigkeit des Bodens.

2.4.3.2 Untersuchungen verschiedener Autoren

Erste Untersuchungen zum Reibungsverhalten zwischen verschiedenen Böden und mehreren Baumaterialien wurden von POTYONDY (1961, [28]) in den USA ausgeführt. Im direkten Schergerät mit 9 cm x 9 cm wurde das Reibungsverhalten zwischen glattem und rauhem Stahl, glattem und rauhem Beton sowie Holz parallel und quer zur Faser und bindigen und nichtbindigen Böden untersucht. In Bild 24 sind Ergebnisse von POTYONDY (1961, [28]) zusammengestellt.

Versuchsergebnisse mit Ton				
Untersuchte Materialien	φ', δ' [°]	c', a' [kN/m ²]	δ'/φ' [-]	\hat{a}/c' [-]
Konsistenzzahl $I_c = 0,94$ [-], $w = 22,8$ [%]				
Ton	16,30	37,5	-	-
Stahl, glatt	9,00	10,0	.55	.27
Stahl, rauh	10,00	17,5	.61	.47
Holz Faser	11,00	15,0	.67	.40
Holz Faser	13,50	19,5	.82	.52
Beton, glatt	16,10	21,3	.97	.57
Konsistenzzahl $I_c = 0,73$ [-], $w = 26,1$ [%]				
Ton	11,30	23,0	-	-
Stahl, glatt	6,30	9,0	.56	.30
Stahl, rauh	5,50	13,3	.50	.58
Holz Faser	7,00	10,5	.61	.46
Holz Faser	8,00	11,5	.69	.50
Beton, glatt	9,30	12,0	.82	.52
Versuchsergebnisse mit Sand				
	φ', δ' [°]	$\tan \varphi'$ [-]	$\tan \delta'/\tan \varphi'$ [-]	
Sand	44,30	0,98	1,00	
Stahl, glatt	24,10	0,45	0,46	
Stahl, rauh	34,00	0,67	0,68	
Holz Faser	35,00	0,70	0,79	
Holz Faser	39,00	0,81	0,82	
Beton, glatt	39,30	0,82	0,89	
Beton, rauh	44,00	0,97	0,98	

Bild 24: Versuchsergebnisse (POTYONDY 1961, [28])

Die Versuchsergebnisse von POTYONDY (1961, [28]) zeigen, daß mit zunehmender Rauigkeit des Baumaterials der Reibungswinkel des Bodens nahezu dem Reibungswinkel zwischen nicht-bindigem Boden und Baumaterial entspricht. Bei Versuchen mit glattem Stahl verringert sich das Verhältnis vom Reibungsbeiwert des Bodens zum Reibungsbeiwert zwischen Boden und Stahl auf $\tan \delta' / \tan \varphi' = 0,47$.

Bei den bindigen Böden nimmt der Reibungswinkel des Bodens und die Kohäsion mit zunehmendem Wassergehalt ab. Bei den Versuchen mit den verschiedenen Baumaterialien wird deutlich, daß die Adhäsion zwischen den Baumaterialien und dem Boden nur zwischen ca. 30 und 60 % der Kohäsion des Bodens erreicht, und die Reibungswinkel zwischen Boden und Baumaterial in Abhängigkeit von der Rauigkeit zwischen 50 und 97 % des Reibungswinkels des Bodens erreichen.

Die von POTYONDY (1961, [28]) ermittelten Schergeraden zwischen verschiedenen Baumaterialien und einem trockenen Sand sind in Bild 25 dargestellt.

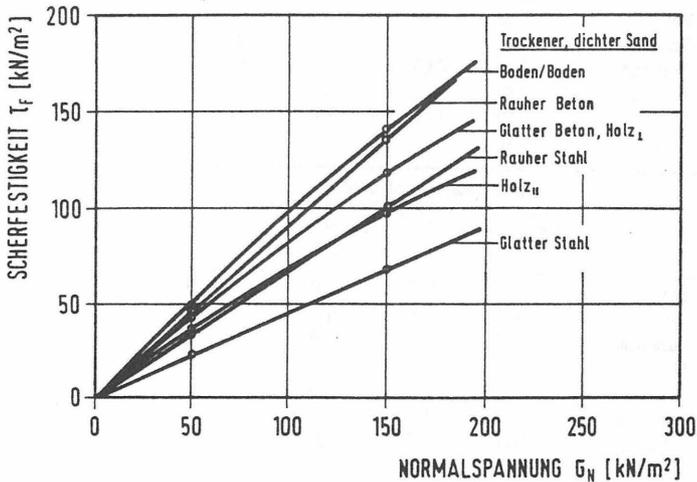


Bild 25: Scherfestigkeit zwischen verschiedenen Baumaterialien und Sand (POTYONDY 1961, [28])

ROWE (1962, [29]) hat den Einfluß der Korngröße nichtbindiger Quarz-Sande auf das Reibungsverhalten zwischen einer glatten Quarzblockoberfläche und dem Quarzsand untersucht. Bild 26 zeigt den Versuchsaufbau nach ROWE (1962, [29]).

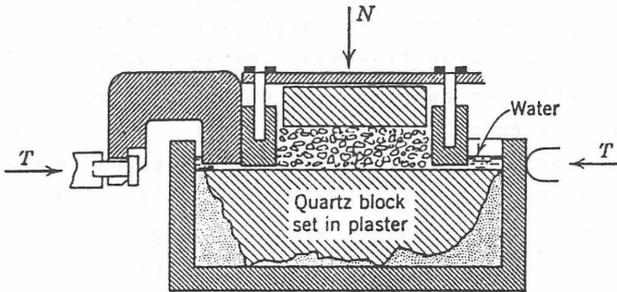


Bild 26: Versuchsaufbau (ROWE 1962, [29])

ROWE hat herausgefunden, daß die Reibungsbeiwerte zwischen dem Sand und der glatten Oberfläche mit zunehmendem Korndurchmesser abnehmen. Nach LAMBE/WHITMANN (1969, [30]) sind bei feinkörnigen Materialien die einzelnen Verzahnungen zwischen den kleineren Körnern untereinander und mit leichten Unregelmäßigkeiten der Oberfläche der Grund für die größeren Reibungsbeiwerte. Mit zunehmendem Korndurchmesser nimmt die Verzahnung zwischen den Körnern ab, außerdem können die größeren Körner leichter über Unregelmäßigkeiten der Oberfläche abrollen. Daher nimmt auch der Reibungsbeiwert ab. Bild 27 stellt die Versuchsergebnisse von ROWE (1962, [29]) dar.

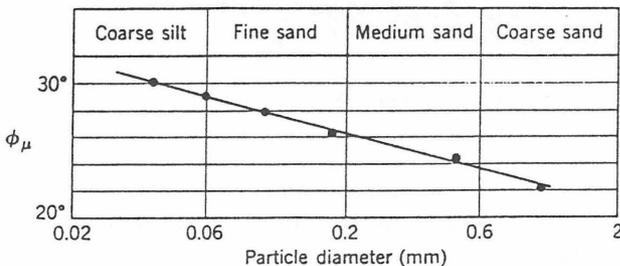
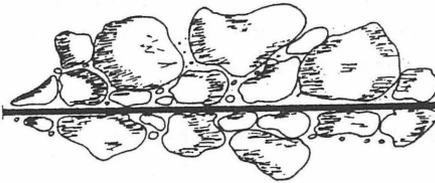
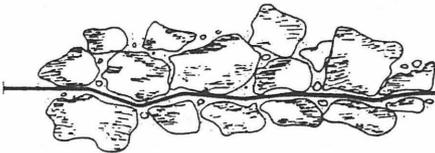


Bild 27: Reibungswinkel von Quarzsand in Abhängigkeit vom Korndurchmesser (ROWE 1962, [29])

Erste Untersuchungen zum Reibungsverhalten zwischen Dichtungsfolien aus Kunststoff wurden von BATEREAU/LATTERMANN (1972, [31], siehe auch [32], [33], [36]) durchgeführt und mit Ergebnissen verschiedener anderer Autoren verglichen. Bei den damals untersuchten Kunststofffolien handelte es sich in fast allen Fällen um glatte Folien aus Polyetylen, PVC oder Butylkautschuk. Die Dicke dieser flexiblen, relativ weichen Folien betrug bei den Versuchen zwischen 0,2 mm und 1,1 mm. Bei einigen Versuchen wurden Dichtungsbahnen mit 2,0 mm Dicke verwendet. BATEREAU (1972, [31]) und andere Autoren berücksichtigten daher eine mögliche Verzahnung der Folien mit dem Untergrund, während bei den heute verwendeten glatten Dichtungsbahnen eine solche formschlüssige Verzahnung nicht mehr gegeben ist. Bild 28 zeigt den Unterschied an der Kontaktfläche zwischen verschiedenen Dichtungsbahnen und dem Boden.



dicke, steife Dichtungsbahn



dünne, flexible Dichtungsbahn

Bild 28: Unterschiedliche Verzahnung zwischen dem Boden und flexiblen bzw. starren Dichtungsbahnen (KNIPPSCHILD 1979, [7])

BATEREAU/LATTERMANN (1972, [31]) treffen in ihrer Schlußbemerkung folgende Feststellungen:

- Ein exakter Vergleich der verschiedenen Versuchsergebnisse ist aufgrund unterschiedlicher verwendeter Versuchsgerate, teilweise fehlender Angaben bzw. Nichtberücksichtigung notwendiger Abhängigkeiten nicht möglich.
- Zahlreiche Ergebnisse müssen als Einzelwerte unter z.T. nicht bekannten Bedingungen angesehen werden.
- Eine allgemeingültige Aussage über die den Reibungsbeiwert zwischen Dichtungsbahnen und Böden beeinflussenden Faktoren kann noch nicht getroffen werden.

Als wesentliche wichtige Punkte werden genannt:

- Die Schwankungen der Versuchsergebnisse werden mit zunehmendem Korndurchmesser geringer.
- Das elastisch-plastische Verhalten der Folie übt einen Einfluß auf das Reibungsverhalten aus.
- Der Reibungsbeiwert zwischen den beiden Baumaterialien (Erdstoff und Folie) ergibt im wassergesättigten Zustand geringere Werte als im trockenen Zustand.
- Der Reibungsbeiwert zwischen rolligem Erdstoff und Folie verringert sich mit größer werdendem Korndurchmesser und strebt einem konstantem Minimalwert zu.
- Der Ungleichförmigkeitsgrad des Erdstoffes beeinflusst den Reibungsbeiwert in gewissen Grenzen.
- Einflüsse die den Reibungsbeiwert evtl. erhöhen, in ihrer Größe aber nicht erfaßbar sind, dürfen nicht berücksichtigt werden.

Die bezogenen Reibungsbeiwerte lagen zwischen 0,7 und 1,0. Daraus folgt, daß von den Dichtungsbahnen zwischen 70 und 100 % der Scherfestigkeit des Bodens erreicht wurden. Die ermittelten Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden lagen je nach Lagerungsdichte des Bodens zwischen 30 und 40 Grad.

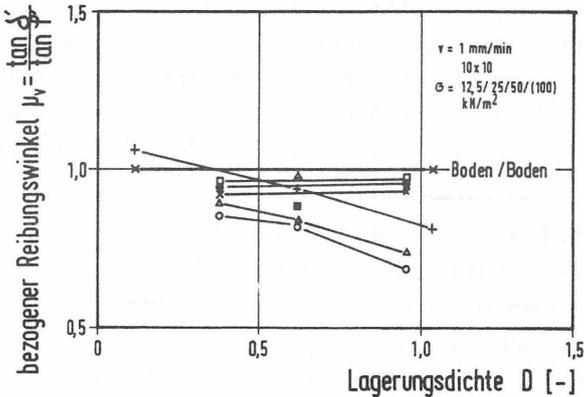


Bild 30: Bezogene Reibungsbeiwerte in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte (BALTHAUS/MESECK 1987, [34])

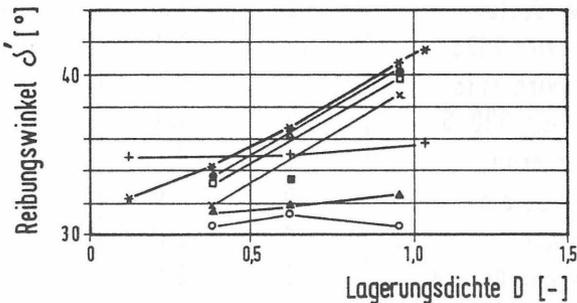


Bild 31: Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte (BALTHAUS/MESECK, 1987, [34])

Von BALTHAUS/MESECK wurden Vergleichsuntersuchungen mit feuchtem Sand durchgeführt. Die Vergleichsuntersuchungen ergaben zwischen feuchtem und trockenem Sand einen Unterschied im Reibungswinkel von maximal 0,5 Grad. Nichtbindige Böden können daher im trockenem Zustand untersucht werden.

In den USA wurde von WILLIAMS (1986, [35]) das Reibungsverhalten zwischen glatten HDPE-Kunststoffdichtungsbahnen und verschiedenen Geotextilien untersucht. Diese Materialien dienen im Deponiebau als Filter-, Trenn- und Schutzschicht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 32 dargestellt. Die Reibungswinkel zwischen der glatten Dichtungsbahn und den unterschiedlichen Geotextilien nehmen nur recht geringe Werte zwischen 6 und 12 Grad an; daher können nur sehr geringe Schubkräfte von dem Filtervlies in die Dichtungsbahn übertragen werden. Ähnliche Versuchsergebnisse zu diesem Thema sind den Literaturstellen [37], [36], [38] und [39] zu entnehmen.

Reibungswinkel zwischen Geotextilien und glatten HDPE - Dichtungsbahnen		
Verwendetes Geotextil	δ' [°]	$\tan \delta'$ [-]
Fibertex 600	8	0,14
Fibertex 300	10	0,18
Typar 3401	11	0,19
Polyfilter X	6	0,11
NW-Geotextile	9	0,16
Trevira 2125	10	0,18
Trevira 1135	12	0,21
Mirafi 500 S	10	0,18
Miradrain	6	0,11
Enkadrain	9	0,16
Geolon	9	0,16
Tensar DN 3 W	15	0,27
J-DRAIN 100	11	0,19

Bild 32: Reibungsverhalten zwischen glatten HDPE - Kunststoffdichtungsbahnen und verschiedenen Filtervliesen (WILLIAMS 1986, [35])

2.4.4 Versuchstechnik

Zur Ermittlung des Reibungsverhaltens zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und Böden wurden mehrere Kastenschervergeräte 10 cm * 10 cm und ein Schergerät 30 cm * 30 cm eingesetzt.

Die Scherveräte bestehen jeweils aus einem oberen und einem unteren Scherrahmen, die gegeneinander horizontal verschieblich gelagert sind. Die zu untersuchenden Dichtungsbahnen wurden jeweils auf einem Distanzstück derart in den unteren Scherrahmen eingebaut, daß die geschlossene Dichtungsbahnoberfläche in der erzwungenen Scherfuge zwischen oberem und unterem Scherrahmen lag. Anschließend wurde der Boden in den oberen Scherrahmen eingebaut und vertikal belastet. Zum Abscheren wurden die Rahmen mit konstanter Abschergeschwindigkeit gegeneinander verschoben. Die Horizontal- und Vertikalverschiebungen des Bodens wurden während des Versuches ebenso wie die für die horizontale Verschiebung erforderliche Kraft ermittelt. Bezogen auf die Größe der Scherfläche ergibt sich die jeweilige Scherspannung. In Bild 33 ist der Aufbau eines Kastenschervergerätes 10 cm * 10 cm skizziert.

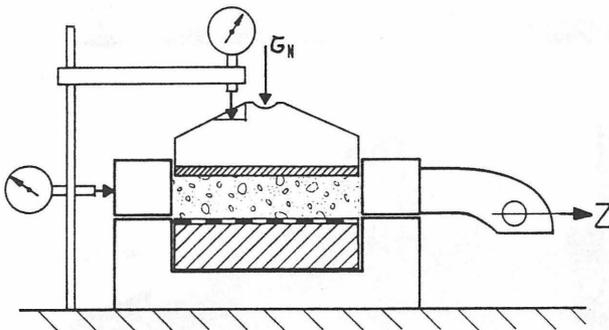


Bild 33: Schematischer Aufbau eines Kastenschervergerätes
10 cm * 10 cm

Eine in den unteren Scherrahmen des 10 cm * 10 cm Schergerätes eingebaute glatte HDPE Dichtungsbahn, deren Oberfläche in der erzwungenen Scherfläche zwischen oberem und unterem Scherrahmen liegt, zeigt Bild 34. Das Schergerät 30 cm * 30 cm ist in Bild 35 abgebildet.

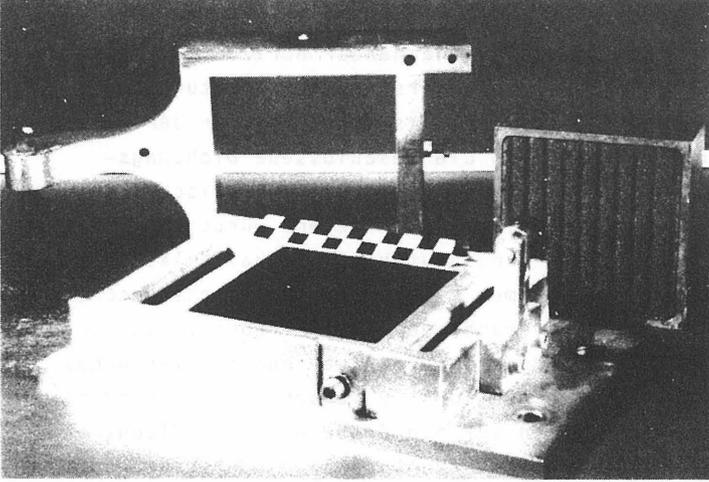


Bild 34: Schergerät 10 cm * 10 cm mit eingebauter Dichtungsbahn

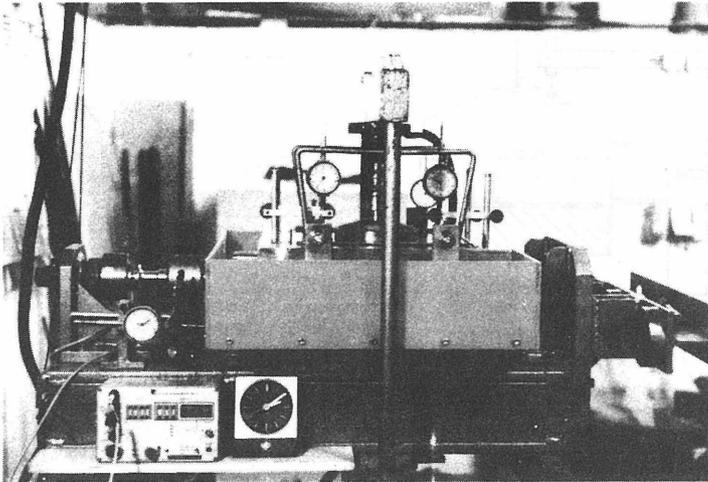


Bild 35: Schergerät 30 cm * 30 cm

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des Reibungsverhaltens zwischen Dichtungsbahnen und Böden besteht in der Ausführung von Herausziehversuchen. Bild 36 ist der prinzipiellen Versuchsaufbau für die Durchführung von Herausziehversuchen skizziert.

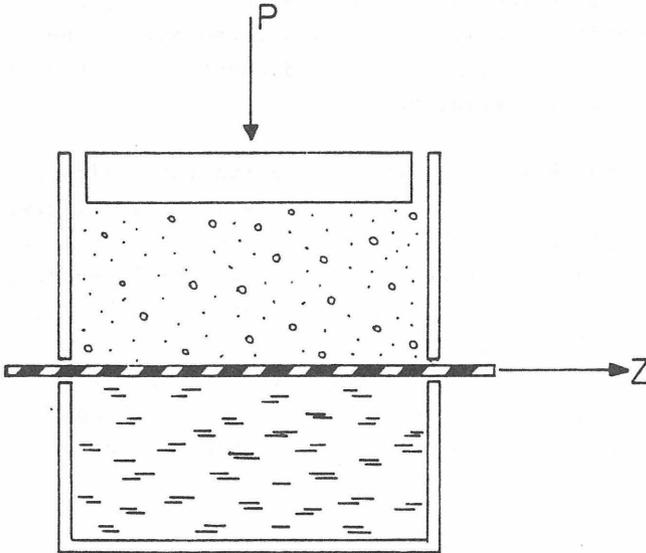


Bild 36: Prinzipieller Versuchsaufbau für Herausziehversuche

Die Dichtungsbahn wird in den Boden eingelegt und vertikal belastet. Anschließend wird die Dichtungsbahn horizontal aus dem Boden herausgezogen. Erfasst werden während des Versuchs die erforderliche Zugkraft und die horizontalen Verschiebungen der Dichtungsbahn. Die erforderliche Zugkraft entspricht den an der Ober- und Unterseite der Dichtungsbahn wirkenden Scherkräften zwischen Boden und Dichtungsbahn. Die Auswertung mehrerer Teilversuche mit unterschiedlichen Vertikallasten erfolgt analog dem direkten Scherversuch in einem Tau/Sigma Diagramm.

3 EIGENE UNTERSUCHUNGEN ZUM REIBUNGSVERHALTEN ZWISCHEN KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHNEN MIT VERSCHIEDENER OBERFLÄCHENSTRUKTUR UND BÖDEN

3.1 Überblick über die eigenen Untersuchungen

Anhand der bisherigen Ausführungen wird deutlich, daß für die Standsicherheit von Kombinationsdichtungen auf Böschungen das Reibungsverhalten zwischen Boden und Kunststoffdichtungsbahn von entscheidender Bedeutung ist.

Aus diesem Grunde wurden verschiedene Kunststoffdichtungsbahnen mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur ausgewählt und in Kombination mit verschiedenen bindigen Bodenmaterialien, die als mineralisches Abdichtungsmaterial bevorzugt eingesetzt werden, sowie mehreren Sanden, die als Schutz- bzw. Filterschicht dienen, untersucht. Die Dichtungsbahnen unterschieden sich aufgrund ihrer Oberflächenstruktur deutlich voneinander und ließen hinsichtlich des Reibungsverhaltens zwischen Dichtungsbahn und Boden unterschiedliche Ergebnisse erwarten.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sollen verdeutlichen, welchen Einfluß die jeweilige Oberflächenstruktur auf das Reibungsverhalten zwischen bindigen Abdichtungsmaterialien und nichtbindigen Schutz- und Filtermaterialien hat und inwieweit das Reibungsverhalten durch die unterschiedlichen bodenmechanischen Parameter der Böden beeinflusst wird.

Durch Versuche mit nichtbindigen Sanden unterschiedlicher Kornverteilung wurden Einflüsse der Korngröße, Kornform sowie des Ungleichförmigkeitsgrades auf das Reibungsverhalten untersucht.

Die Versuche mit bindigen, mineralischen Abdichtungsmaterialien sollen dagegen aufzeigen, welchen Einfluß die Oberflächenstruktur der Dichtungsbahnen bei optimaler Verdichtung der bindigen Materialien auf das Reibungsverhalten ausübt. Da besonders die Oberfläche der mineralischen Dichtungsschicht und damit auch die Kontaktfläche zur Kunststoffdichtungsbahn, unterschiedlichen Witterungsverhältnissen und daraus resultierenden Wassergehaltsschwankungen ausgesetzt ist, wurde zusätzlich untersucht, welche Einflüsse sich aus Wassergehaltsänderungen innerhalb der zulässigen Einbauwassergehalte der bindigen Materialien auf die Scherparameter des Bodens selbst und auf den Reibungswinkel ϕ' und die Adhäsion a' zwischen Dichtungsbahnen und Boden ergeben. Die jeweils verwendeten Bodenarten und ihre bodenmechanischen Eigenschaften sind in den entsprechenden Kapiteln dargestellt. Außerdem wurden Versuche zum Reibungsverhalten zwischen Geotextilien, die als Trenn-, Filter-, oder Schutzschicht innerhalb des Kombinationsdichtungssystems Anwendung finden, nichtbindigen Böden und einer glatten Dichtungsbahn ausgeführt.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den Versuchsergebnissen werden in Empfehlungen für die versuchstechnische Ermittlung von Scherparametern zusammengefaßt. Weiterhin werden für Vorplanungen und Entwürfe Scherparameter zum Reibungsverhalten zwischen Kunststoffdichtungsbahnen, verschiedenen Böden und Geotextilien angegeben. Abschließend wird anhand eines Beispiels erläutert, welche Auswirkungen sich aus den gewonnenen Erkenntnissen für das Kombinationsdichtungssystem in den verschiedenen Bau- und Betriebsphasen ergeben und welche Maßnahmen geeignet sind, um Überbeanspruchungen der Dichtungsbahn zu vermeiden und ein qualitativ hochwertiges, standsicheres Kombinationsdichtungssystem, das den vielfältigen Beanspruchungen gerecht wird, zu erhalten.

3.2 Verwendete Kunststoffdichtungsbahnen

Für den Einsatz in Kombinationsdichtungen werden bevorzugt HDPE-Kunststoffdichtungsbahnen eingesetzt, die i. a. eine glatte Oberfläche besitzen.

Für die Durchführung der Versuche mit Dichtungsbahnen mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen wurden – aus einer Vielzahl von verschiedenen auf dem Markt befindlichen – sechs Dichtungsbahnen ausgewählt. Es handelte sich hierbei um reine HDPE-Dichtungsbahnen sowie modifizierte Dichtungsbahnen aus HDPE und ECB (Ethylen-Copolymerisat Bitumen), wobei die modifizierten Dichtungsbahnen ein anderes Kraftverformungsverhalten aufweisen als die reinen HDPE-Dichtungsbahnen (siehe Bild 37).

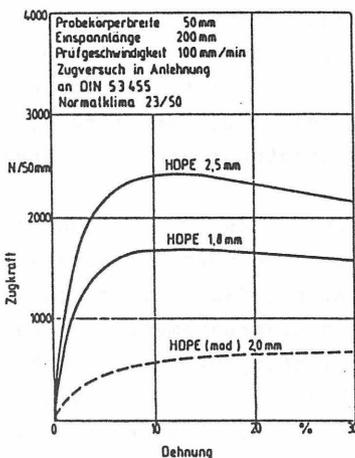


Bild 37: Kraftdehnungsverhalten von HDPE- und modifizierten HDPE/ECB - Dichtungsbahnen (KNIPPSCHILD 1985, [2])

In Bild 38 sind die Abmessungen und Oberflächenstrukturen der verwendeten Dichtungsbahnen schematisch dargestellt.

Abbildungen der einzelnen Dichtungsbahnen sind in Bild 39 zu sehen.

Maße und Oberflächenstruktur der verwendeten Dichtungsbahnen

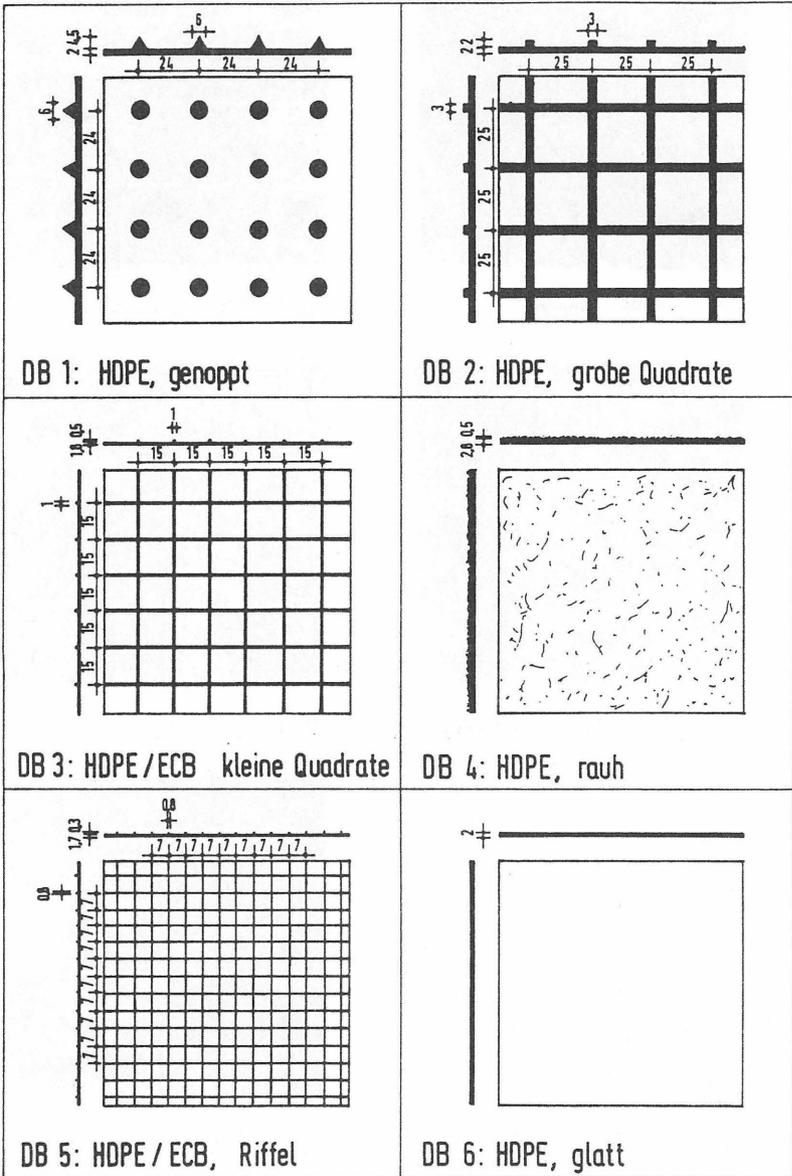
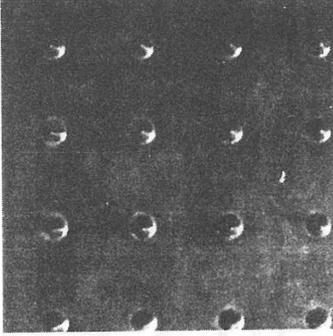
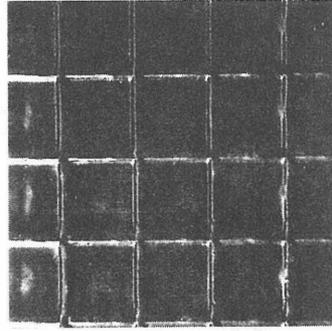


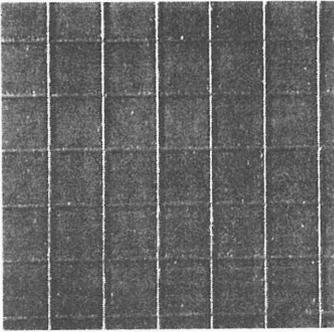
Bild 38: Schematische Darstellung der Oberflächenstrukturen und Abmessungen der Dichtungsbahnen DB1 - DB6



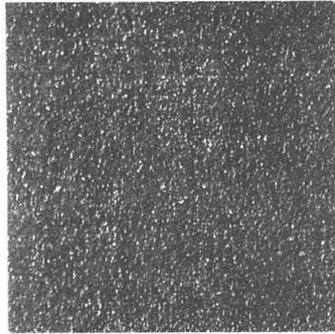
DB 1: HDPE, genoppt



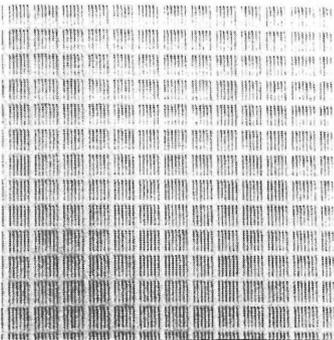
DB 2: HDPE, grobe Quadrate



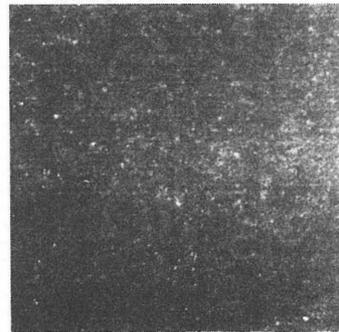
DB 3: HDPE/ECB, kleine Quadrate



DB 4: HDPE, rauh



DB 5: HDPE/ECB, Riffel



DB 6: HDPE, glatt

3.3 Scherversuche mit nichtbindigen, gleichförmigen Sanden

3.3.1 Verwendete Böden und Versuchsmethodik

Zunächst wurde eine Versuchsreihe mit drei verschiedenen nichtbindigen Sanden durchgeführt, um zu ermitteln, in welcher Größenordnung die Unterschiede im Kraftübertragungsverhalten durch die verschiedenen Oberflächenstrukturen der Dichtungsbahnen liegen, und welche Einflüsse die unterschiedlichen Korndurchmesser der verwendeten Sande auf das Reibungsverhalten haben.

Die Versuche wurden im Kastenschерgerät mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm ausgeführt. Diese Schergeräte sind im bodenmechanischen Versuchswesen weit verbreitet und werden seit Jahrzehnten zur Ermittlung der Scherparameter von Böden erfolgreich angewendet. Jeder Scherversuch teilte sich in drei Versuche mit jeweils unterschiedlicher Normalspannung von $G_N = 25, 50$ und 100 kN/m^2 . Als Versuchsgeschwindigkeit wurde die in der Bodenmechanik für nichtbindige Böden übliche Schergeschwindigkeit $v = 1,0 \text{ mm/min}$ gewählt. Die verwendeten Sande wurden trocken mit dichter Lagerung in den oberen Scherrahmen eingebaut, nachdem im unteren Scherrahmen bereits die zu untersuchende Dichtungsbahn eingepaßt war. Anschließend wurde die Normalspannung G_N aufgebracht und der Scherversuch durchgeführt. Jeder Scherversuch wurde mindestens dreimal wiederholt. Insgesamt wurden in dieser Versuchsreihe 72 Teilversuche ausgeführt. Die nachfolgend dargestellten Versuchsergebnisse sind Mittelwerte der jeweils drei ausgeführten Scherversuche.

Die Kornverteilungslinie der verwendeten Sande und die bodenmechanischen Kennwerte sind in Bild 40 und Bild 41 dargestellt. Es handelte sich um einen gleichförmigen Mittelsand B1, einen Feinsand B2 und einen Grobsand B3.

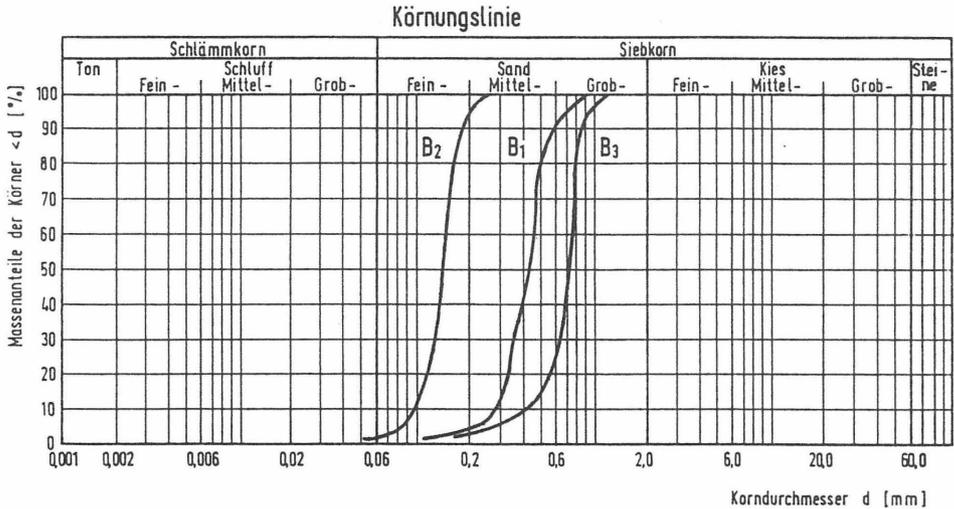


Bild 40: Kornverteilungslinien der verwendeten Sande

Sand	Mittelsand B 1	Feinsand B 2	Grobsand B 3
Bodenart n. DIN 4022	mS,gs'	fS,ms'	gS,ms'
Bodenart n. DIN 18 196	SE	SE	SE
Kornrauigkeit	rundkantig	rundkantig	glatt → gerundet
Ungleichförmigkeit U [-]	1,54	1,45	1,56
Krümmung C_c [-]	0,90	0,96	1,34
e_{min} / e_{max} [-]	0,646/0,906	0,656/0,920	0,506/0,532
n_{min} / n_{max} [-]	0,392/0,475	0,396/0,479	0,336/0,347
$\rho_{dmin} / \rho_{dmax}$ [t/m ³]	1,39/1,61	1,38/1,60	1,53/1,76
Reibungswinkel φ' [°]	44,6	37,9	45,6

Bild 41: Bodenmechanische Kennwerte der verwendeten Sande

Während des Versuches wurden die horizontalen Verschiebungen des oberen Scherrahmens und die Vertikalverschiebungen der Auflastplatte sowie die für den Schervorgang erforderliche Zugkraft Z ermittelt. Da sich während des Abschervorgangs die Scherfläche ständig durch die horizontale Verschiebung v_h der Scherrahmen gegeneinander auf die aktuelle Scherfläche mit der Breite b um den Betrag $dF = b * v_h$ verringerte, wurde die Auswertung der Scherversuche mittels eines Rechnerprogramms, das die jeweils aktuelle Scherspannung $\tau_F = Z/(F - dF)$ berechnete, vorgenommen. Für die Ermittlung der Schergeraden wurden jeweils mehrere Teilversuche bei unterschiedlichen Auflasten ausgeführt und aus den erreichten maximalen Scherfestigkeiten im Bruchzustand Mittelwerte gebildet. Da für jeden Teilversuch der Boden erneut eingebaut und verdichtet werden muß, ergeben sich zwangsläufig geringe Abweichungen der jeweils ermittelten maximalen Scherfestigkeiten im Bruchzustand. Insgesamt können die Versuchsergebnisse als hinreichend genau angesehen werden, da die mittlere Abweichung der einzelnen Teilversuche vom Mittelwert recht gering blieb. Sie betrug für die Versuche mit

Mittelsand	B1	1,7 %
Feinsand	B2	2,1 %
Grobsand	B3	1,5 %.

Speziell bei der Versuchsdurchführung im Bereich kleiner Auflasten führen zusätzliche Einflüsse wie z.B. die Reibung der Scherrahmen, die durch feine Körner zwischen diesen erhöht wird, sowie Verzahnungen in der unvermeidlichen kleinen Fuge zwischen der eingebauten Dichtungsbahn und dem unteren Scherrahmen zur Ermittlung erhöhter, maximaler Scherfestigkeiten. Dadurch treten bei der Auswertung teilweise geringe Kohäsions bzw. Adhäsionsanteile auf. Da es sich bei den verwendeten Böden um nichtbindige, kohäsionslose Materialien handelt und diese im trockenen Zustand abgeschert wurden, müssen diese Anteile auf versuchsbedingte Einflüsse zurückgeführt werden.

Zur Ermittlung der Schergeraden wurde zunächst durch die Mittelwerte der erreichten maximalen Scherfestigkeiten eine Ausgleichsgerade gelegt und der Reibungswinkel bestimmt. Zusätzlich wurde jeweils der Nullpunkt als Zwangspunkt eingeführt und die Schergeraden in diesen verschoben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und aufgrund der geringen Abweichungen innerhalb der einzelnen Teilversuche wurden in den nachfolgenden Scherfestigkeits-/ Normalspannungsdiagrammen nur die Schergeraden für die Versuche mit den verwendeten Böden und unterschiedlichen Dichtungsbahnen dargestellt. Grundsätzlich besteht, wie bereits oben erläutert, für die Scherfestigkeiten kohäsionsloser Böden folgender Zusammenhang :

Scherfestigkeit des Bodens

$$\tau_F = \sigma_N * \tan \varphi'$$

Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn

$$\tau_{DB} = \sigma_N * \tan \delta'$$

Durch die Angabe von bezogenen Reibungsbeiwerte $\mu_v = \tan \delta' / \tan \varphi'$, die den Anteil der erreichten Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden, bezogen auf die Scherfestigkeit des Bodens ausdrücken, werden gleichzeitig versuchsbedingte Einflüsse eliminiert, die Angaben für die übertragbaren Scherfestigkeiten zwischen Boden und Dichtungsbahnen werden untereinander vergleichbar und unabhängig vom tatsächlichen Reibungswinkel der Böden.

3.3.2 Versuchsergebnisse mit Mittelsand B1

Die in Bild 42 und Bild 43 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, daß mit abnehmender Oberflächenprofilierung der Dichtungsbahnen DB1 - DB6 die Scherfestigkeiten zwischen dem Boden und der Dichtungsbahn abnehmen. Die Scherfestigkeit zwischen dem Mittelsand und der glatten Dichtungsbahn DB6 und der nur schwach profilierten Dichtungsbahn DB5 ist deutlich geringer als die Scherfestigkeit des Bodens selbst. Bei den stark strukturierten Dichtungsbahnen DB1 und DB2 wird annähernd die Scherfestigkeit des Bodens erreicht, bzw. im Versuch mit der DB2 sogar überschritten.

Wie bereits in Kapitel 2.4.3.1, S. 36 erwähnt, kann theoretisch maximal die Scherfestigkeit des Bodens erreicht werden, daher ist nur durch versuchsbedingte Einflüsse zu erklären, daß die ermittelte Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn DB2 und dem Boden die Scherfestigkeit des Bodens übersteigt. Bedingt durch die starke Oberflächenprofilierung muß sich im Schergerät die erzwungene Scherfuge oberhalb der Dichtungsbahnprofilierungen ausbilden. Dafür sind zunächst größere Scherkräfte erforderlich als im Scherversuch mit dem Mittelsand selbst.

Bereits nach geringen Horizontalverschiebungen von zwei bis drei Millimetern tritt der Bruch durch Überschreiten der maximalen Scherfestigkeit zwischen Boden und den Dichtungsbahnen bzw. im Boden selbst auf. Nach dem Erreichen der maximalen Scherfestigkeit im Bruchzustand ist eine deutliche Abnahme der Scherfestigkeit auf die Restscherfestigkeit bzw. die Gleitfestigkeit zu erkennen. Bei den Dichtungsbahnen mit glatter bzw. geringer Oberflächenprofilierung ist nur ein geringer Unterschied zwischen der maximalen Scherfestigkeit im Bruchzustand und der Restscherfestigkeit zu verzeichnen, die maximale Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn ist deutlich geringer als die Scherfestigkeit des Bodens selbst. Im Bild 44 und Bild 45 ist die Entwicklung der Scherfestigkeit über der Horizontalverschiebung jeweils für den Teilversuch mit einer Normalspannung $\sigma_N = 100 \text{ kN/m}^2$ aufgetragen.

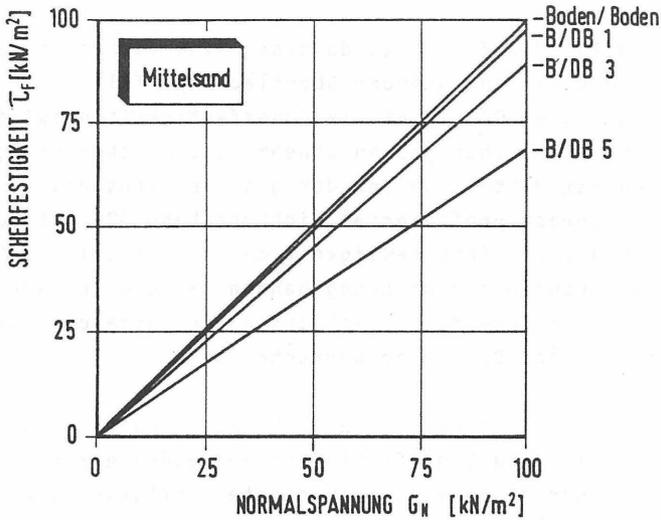


Bild 42: Scherfestigkeiten zwischen Mittelsand B1 und Dichtungsbahnen verschiedener Oberflächenstruktur

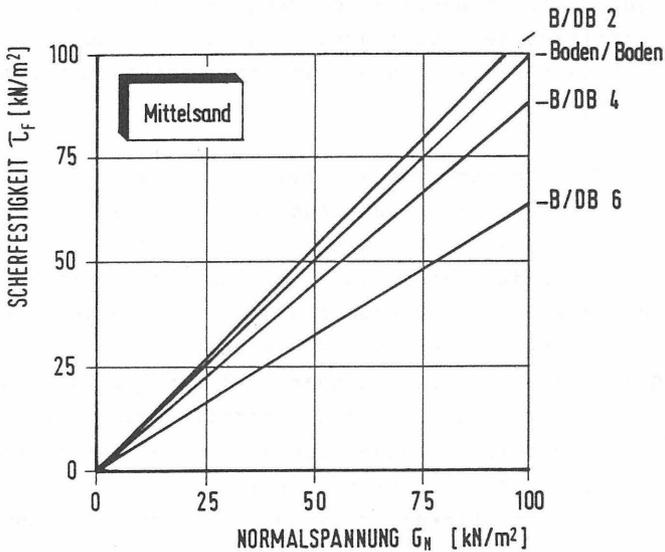


Bild 43: Scherfestigkeiten zwischen Mittelsand B1 und Dichtungsbahnen verschiedener Oberflächenstruktur

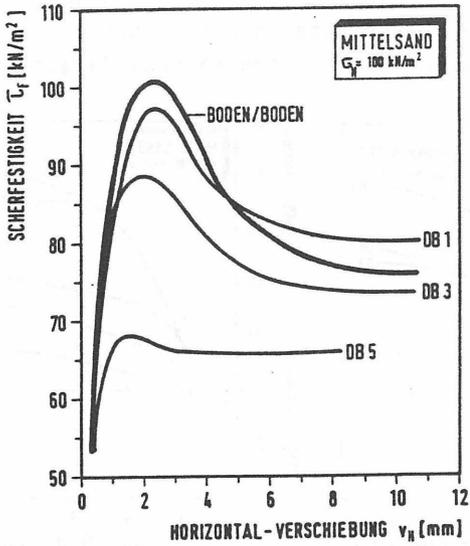


Bild 44: Entwicklung der Scherfestigkeit über der Horizontalverschiebung (Mittelsand B1)

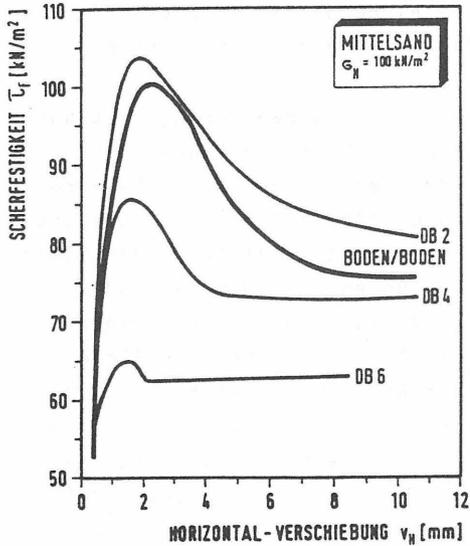
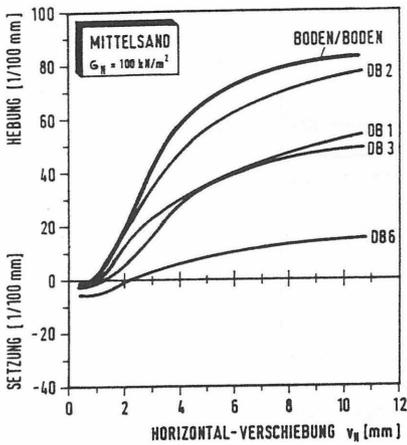
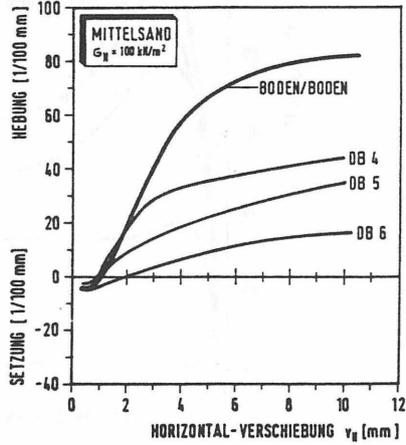


Bild 45: Entwicklung der Scherfestigkeit über der Horizontalverschiebung (Mittelsand B1)

Im Bild 46a und Bild 46b sind die während der Versuche mit einer Normalspannung von $G_N = 100 \text{ kN/m}^2$ auftretenden Vertikalverschiebungen der Lastplatte in Abhängigkeit von der Horizontalverschiebung des oberen Scherrahmens dargestellt.



a.



b.

Bild 46: Vertikalverschiebungen in Abhängigkeit von der Horizontalverschiebung (Mittelsand B1)

Zunächst waren bei allen Versuchen geringe Setzungen der Lastplatte zu verzeichnen. Diese Setzungen entstanden zum einen durch die vor dem Versuch aufgebrachte Normalspannung G_N und zum anderen durch eine zusätzliche Verdichtung, die der Boden durch die beginnende Einleitung der Scherkräfte erfuhr. Um jedoch die im Boden und zwischen Boden und Dichtungsbahn vorhandenen Verzahnungen zu überwinden, waren je nach Dichtungsbahnprofilierung unterschiedliche Hebungen erforderlich. Nach einer Horizontalverschiebung von 2 bis 3 mm und dem Erreichen der maximalen Scherfestigkeit und Eintritt des Bruchzustandes nahmen die Hebungen weiter zu. Bedingt durch diese Hebungen lockerte sich der Boden auf, die Verzahnungen der Bodenteilchen untereinander und mit der Dichtungsbahn wurden verringert und die Scherfestigkeit fiel auf die Restscherfestigkeit ab.

3.3.3 Versuchsergebnisse mit Feinsand B2

In den Bilder 47 und 48 sind die Schergeraden der Versuche mit dem Feinsand und den verschiedenen Dichtungsbahnen aufgetragen.

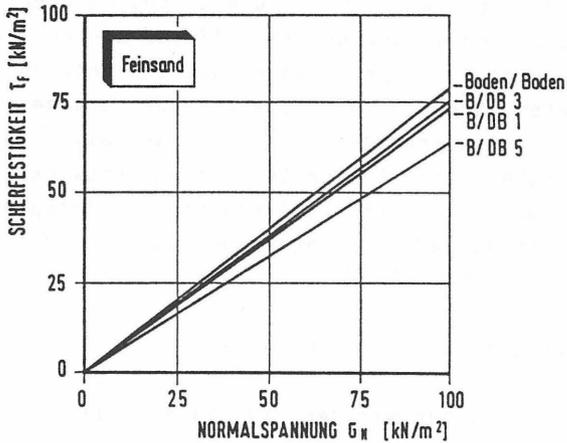


Bild 47: Scherfestigkeits - Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Feinsand B2

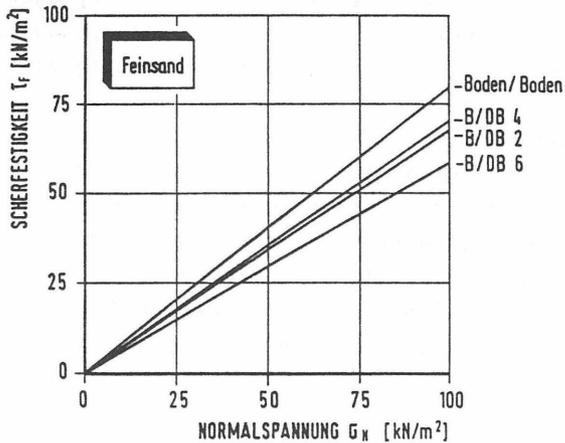


Bild 48: Scherfestigkeits - Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Feinsand B2

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse dieser Versuche, daß die geringsten Scherfestigkeiten zwischen Boden und der glatten Dichtungsbahn DB6 erreicht werden. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Dichtungsbahnen sind jedoch nicht deutlich ausgeprägt. Während und nach den Versuchen war zu beobachten, daß feinste Sandkörner zwischen den oberen und unteren Scherrahmen traten und sich in der unvermeidlichen kleinen Fuge zwischen der eingepaßten Dichtungsbahn und dem unteren Scherrahmen verspannten. Dadurch wurde die Reibung zwischen dem oberen und unteren Scherrahmen vergrößert und somit die gesamte Scherfestigkeit erhöht. Der Verlauf der Entwicklung der Scherfestigkeit über die Horizontalverschiebung entsprach, ebenso wie der Verlauf der Setzungen und Hebungen, dem Versuchsverlauf bei dem Mittelsand.

3.3.4 Versuchsergebnisse mit Grobsand B3

Auch bei diesen Versuchen war der Einfluß der Oberflächenprofilierung der einzelnen Dichtungsbahnen deutlich zu erkennen. Durch die starke Oberflächenstrukturierung der Dichtungsbahnen DB1 und DB2 wurden nahezu 85 - 90 % der Scherfestigkeit des Bodens zwischen Dichtungsbahn und Boden übertragen, während die Scherfestigkeit zwischen der glatten Dichtungsbahn DB6 und dem Boden etwa die Hälfte der Scherfestigkeit des Bodens erreicht. Der Verlauf der Scherfestigkeitsentwicklung und der Hebungen und Setzungen über die Horizontalverschiebung entsprach dabei grundsätzlich den gleichen Kurven wie bereits für den Mittelsand beschrieben. Um die Verzahnungen zwischen den Profilierungen der grob strukturierten Dichtungsbahnen zu überwinden sind deutlich größere Scherkräfte und Hebungen erforderlich als bei den glatten und wenig strukturierten Dichtungsbahnen. In den Bildern 49 und 50 sind die Versuchsergebnisse mit dem Grobsand graphisch dargestellt.

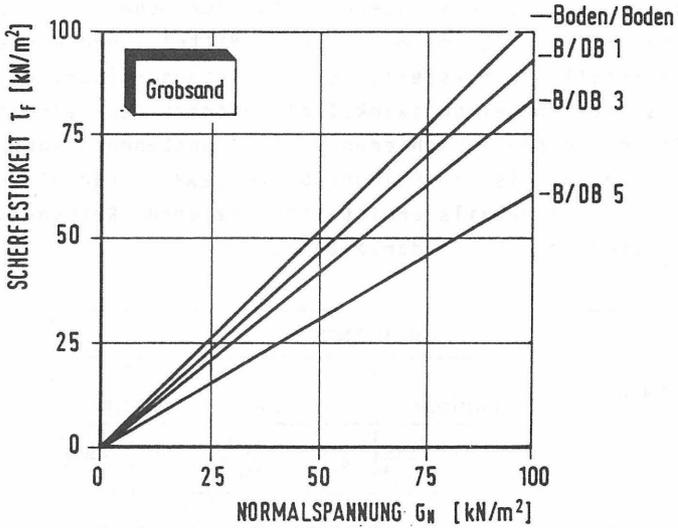


Bild 49: Scherfestigkeits-Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Grobsand B3

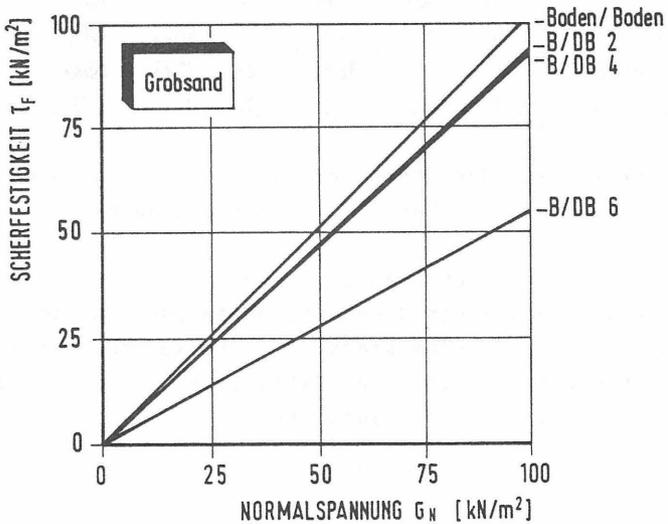


Bild 50: Scherfestigkeits - Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Grobsand B3

3.3.5 Zusammenstellung der Ergebnisse

Im Bild 51 sind die Versuchsergebnisse der Scherversuche im Schergerät 10 cm * 10 cm mit Fein-, Mittel- und Grobsand zusammengestellt. Dargestellt ist der Reibungswinkel des Bodens φ' sowie der Reibungswinkel δ' zwischen den verschiedenen Böden und den verschiedenen Dichtungsbahnen. Außerdem wurde das Verhältnis der Reibungsbeiwerte $\mu_V = \tan \delta' / \tan \varphi'$ aufgetragen. Die jeweils ermittelten bezogenen Reibungsbeiwerte μ_V sind in Bild 52 dargestellt.

Versuchsergebnisse						
Boden	B1 Mittelsand		B2 Feinsand		B3 Grobsand	
	δ', φ'	$\mu_V = \frac{\tan \delta'}{\tan \varphi'}$	δ', φ'	$\mu_V = \frac{\tan \delta'}{\tan \varphi'}$	δ', φ'	$\mu_V = \frac{\tan \delta'}{\tan \varphi'}$
	[°]	[-]	[°]	[-]	[°]	[-]
Boden/Boden	44,65	1,00	37,95	1,00	45,57	1,00
Boden/DB 1	43,47	0,96	35,88	0,93	42,30	0,89
Boden/DB 2	45,85	1,04	33,56	0,85	42,89	0,91
Boden/DB 3	40,96	0,88	36,74	0,96	39,18	0,80
Boden/DB 4	40,96	0,88	34,22	0,87	42,30	0,89
Boden/DB 5	33,82	0,68	32,62	0,82	30,75	0,58
Boden/DB 6	32,13	0,64	29,90	0,74	28,37	0,53

Bild 51: Ergebnisse der Scherversuche mit verschiedenen, gleichförmigen Sanden und Dichtungsbahnen

Deutlich ist zu erkennen, daß zum einen mit abnehmender Oberflächenstrukturierung der Dichtungsbahnen und zum anderen mit der Zunahme des Korndurchmessers der untersuchten Sande eine Abnahme der übertragbaren Scherfestigkeiten zwischen dem Boden und den Dichtungsbahnen auftritt.

Die geringste Scherfestigkeit ist jeweils zwischen Boden und der glatten Dichtungsbahn übertragbar, während mit zunehmender Dichtungsbahnstrukturierung das Verhältnis der Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden zur Scherfestigkeit des Bodens steigt. Mit zunehmendem Korndurchmesser der untersuchten Sande nimmt das Verhältnis der Reibungsbeiwerte ab. Besonders deutlich ist dies bei den Dichtungsbahnen mit glatter bzw. geringer Oberflächenstrukturierung zu erkennen. Dieser Zusammenhang entspricht den bereits erwähnten Untersuchungen von ROWE (1962, [29]), der zwischen einer glatten Quarzblockoberfläche und Quarzsanden verschiedener Korndurchmesser ebenfalls eine Abnahme der übertragbaren Scherkräfte mit zunehmendem Korndurchmesser ermittelte.

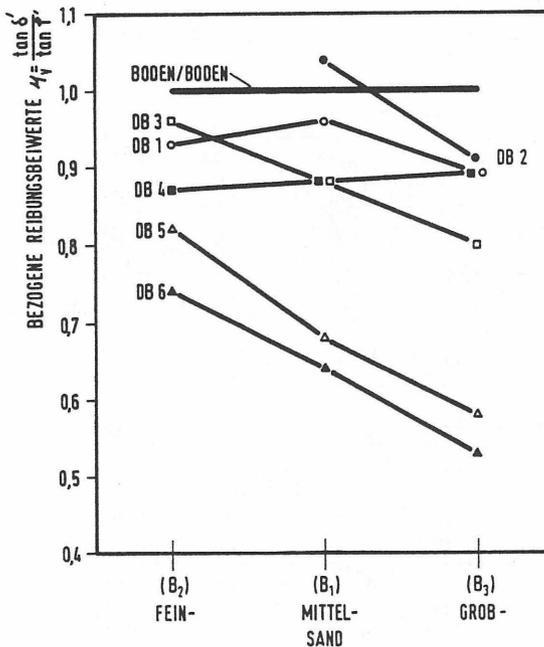


Bild 52: Bezogene Reibungsbeiwerte in Abhängigkeit von den untersuchten Sanden für verschiedene Dichtungsbahnen

3.4 Scherversuche mit ungleichförmigen Sanden

3.4.1 Verwendete Böden und Versuchsmethodik

In einer zweiten Versuchsserie wurde das Reibungsverhalten zwischen drei ungleichförmigen Sanden Boden B4, B5 und B6 und den verwendeten Dichtungsbahnen DB1 bis DB6 im Kastenschergerät 10 cm * 10 cm untersucht.

Bild 53 zeigt die Kornverteilungslinien der untersuchten ungleichförmigen Sande. Der Ungleichförmigkeitsgrad $U = d_{60}/d_{10}$ und der Reibungswinkel φ' beträgt für:

Boden B4 :	$U = 2,46$,	$\varphi' = 44,5^\circ$
Boden B5 :	$U = 4,67$,	$\varphi' = 46,1^\circ$
Boden B6 :	$U = 6,15$,	$\varphi' = 46,2^\circ$

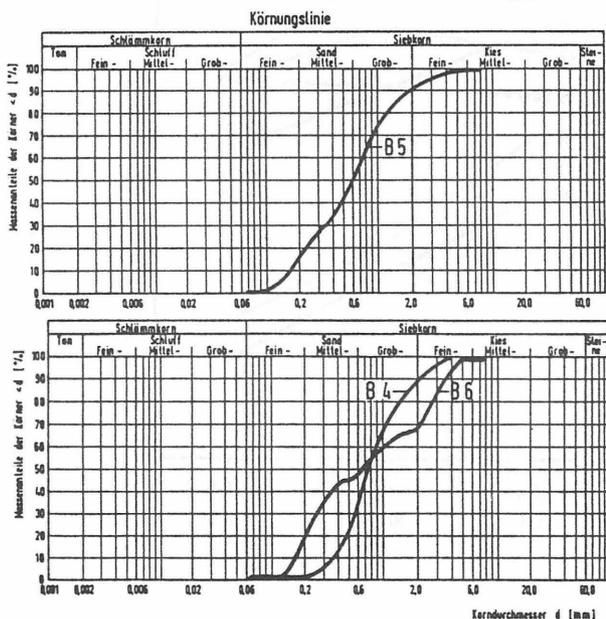


Bild 53: Kornverteilungslinien der untersuchten ungleichförmigen Sande B4, B5 und B6

Die Auflasten betragen wie bei der vorherigen Versuchsserie ebenfalls $G_N = 25, 50$ und 100 kN/m^2 , die Versuchsgeschwindigkeit $1,0 \text{ mm/min}$.

3.4.2 Versuchsergebnisse

In Bild 54 sind die ermittelten Schergeraden für die Versuche mit dem Boden B5 aufgetragen. Deutlich ist auch bei diesen Versuchen zu erkennen, daß mit abnehmender Oberflächenstrukturierung die Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn abnimmt. Ähnliche Ergebnisse ergaben die Versuche mit den Böden B4 und B6. Grundsätzlich war bei dieser Versuchsserie nach Überschreiten der maximalen Scherfestigkeit wieder eine Abnahme der Scherfestigkeit auf die Gleit- oder Restscherfestigkeit zu beobachten, wie es bereits bei der vorherigen Versuchsserie deutlich der Fall war. Daher wird hier auf eine detaillierte Darstellung der einzelnen Versuchsdiagramme verzichtet.

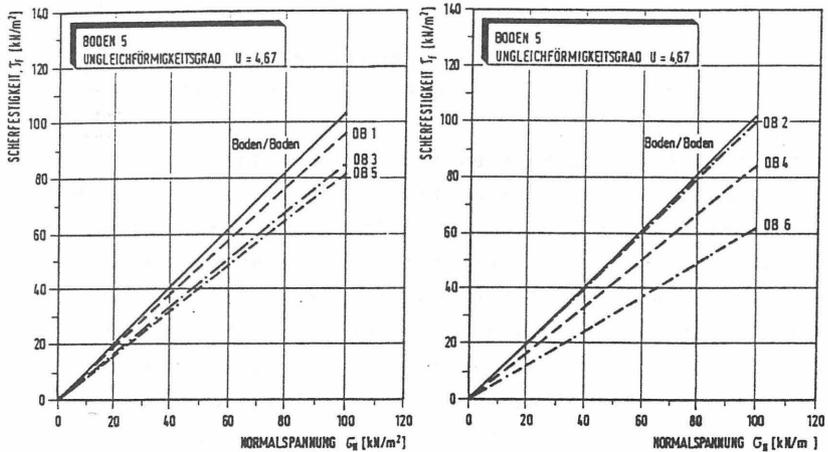


Bild 54: Scherfestigkeits- Normalspannungsdiagramm für Boden B5 und den Dichtungsbahnen DB1-DB6

Die Versuchsergebnisse der zweiten Versuchsserie sind im Bild 55 zusammengestellt.

Versuchsergebnisse						
BODEN	B 4		B 5		B 6	
	δ', ρ'	$\mu_v = \frac{\tan \delta'}{\tan \rho'}$	δ', ρ'	$\mu_v = \frac{\tan \delta'}{\tan \rho'}$	δ', ρ'	$\mu_v = \frac{\tan \delta'}{\tan \rho'}$
	[°]	[-]	[°]	[-]	[°]	[-]
Boden/Boden	44,5	1,00	46,1	1,00	46,2	1,00
Boden/ DB 1	42,1	0,92	44,3	0,94	44,9	0,96
Boden/ DB 2	43,9	0,98	45,9	0,99	47,6	1,05
Boden/ DB 3	42,9	0,95	40,6	0,83	44,2	0,93
Boden/ DB 4	39,3	0,83	40,3	0,82	44,6	0,95
Boden/ DB 5	41,5	0,90	39,5	0,79	38,9	0,77
Boden/ DB 6	30,7	0,60	31,4	0,59	37,0	0,72

Bild 55: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse der Versuche mit ungleichförmigen Sanden

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß sich die Reibungswinkel der Sande untereinander nur unwesentlich unterscheiden; der Einfluß der Oberflächenstruktur der verschiedenen Dichtungsbahnen ist jedoch unverkennbar. Die deutlich geringsten Reibungsbeiwerte $\tan \delta'$ werden zwischen der glatten Dichtungsbahn und den Böden erreicht. Bei den übrigen Dichtungsbahnstrukturen zeigte sich zwar ebenfalls eine geringere Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden, jedoch war eine eindeutige Abhängigkeit der übertragbaren Scherkräfte vom Ungleichförmigkeitsgrad und einer bestimmten Dichtungsbahnprofilierung nicht zu erkennen.

Bild 56 veranschaulicht die Versuchsergebnisse graphisch. Dargestellt sind die bezogenen Reibungsbeiwerte μ_v , also das Verhältnis von $\tan \delta' / \tan \rho'$.

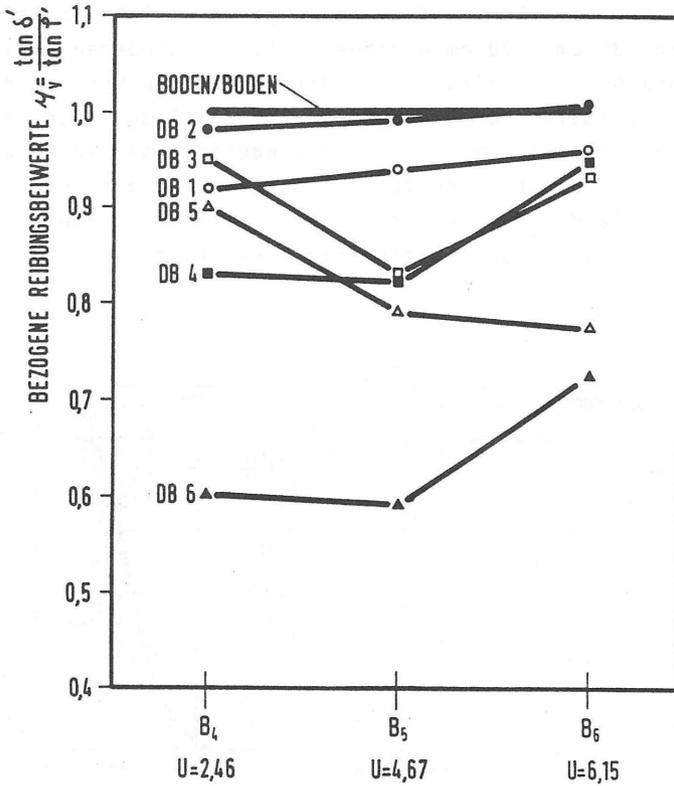


Bild 56: Bezogene Reibungsbeiwerte $\tan \delta' / \tan \rho'$ für die untersuchten Dichtungsbahnen und verschiedene, ungleichförmige Sande

3.5 Scherversuche mit Kies

3.5.1 Verwendeter Boden und Versuchsmethodik

Da der zu untersuchende Korngrößenbereich aufgrund der Geräteabmessungen im Kastenschengerät 10 cm * 10 cm begrenzt ist, wurden die Versuche mit einem Kiesmaterial, das für den Einsatz als Flächenfilter auf Deponien geeignet ist, im Kastenschengerät 30 cm * 30 cm durchgeführt. Die größeren Abmessungen des Gerätes erlauben die Untersuchungen von Kiesen bis zu einem maximalen Korndurchmesser von $d = 8$ mm, ohne den empfohlenen Modell - Maßstab von Korndurchmesser zu Probenhöhe = 1 : 10 zu überschreiten. Bild 57 zeigt die Kornverteilungslinie des untersuchten Kiesmaterials; es handelte sich hierbei um einen mittelkiesigen Feinkies.

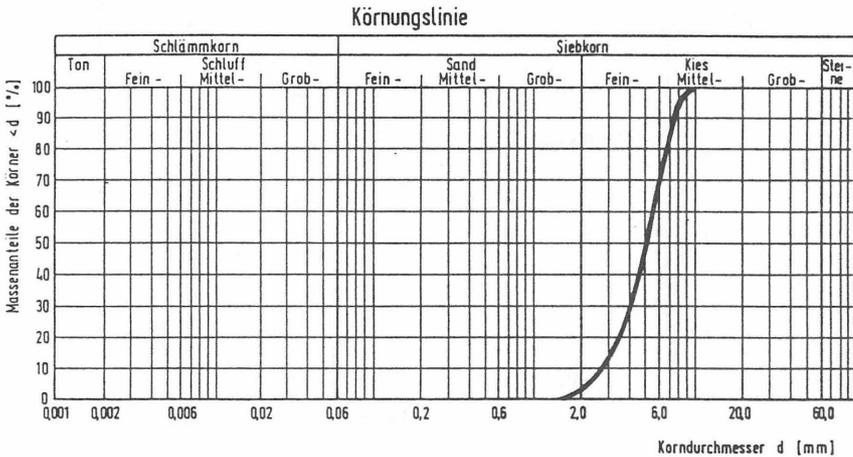


Bild 57: Kornverteilungslinie des untersuchten Kiesel

Bei den im Schergerät 30 cm * 30 cm ausgeführten Versuchen betrug die Normalspannung der einzelnen Teilversuche $\sigma_N = 80, 160$ und 240 kN/m^2 , die Versuchsgeschwindigkeit wurde mit $v = 1,0 \text{ mm/min}$ gewählt.

Während des Abscherens auftretende Kippmomente der Lastplatte, die eine örtliche Verspannung der untersuchten Materialien hervorrufen können, sind gegebenenfalls für die beim Abschervorgang auftretenden höheren Scherkräfte verantwortlich. Bild 58 zeigt die mögliche veränderte Normalspannungsverteilung, die durch die Schiefstellung der Kopfplatte hervorgerufen werden kann. Diese nicht direkt meßbaren Verspannungen führten bei der Versuchsauswertung zu hohen Reibungswinkeln und teilweise selbst bei nichtbindigen, trocknen Böden zu einer Scherfestigkeit mit einem Kohäsionsanteil. Diese Vorgänge sind besonders bei Versuchen mit grobkörnigen Materialien festzustellen.

Im Gegensatz zu den Versuchen im Schergerät 10 cm * 10 cm war ein eindeutiger Bruchzustand während des Abscherens mit anschließender Abnahme der Scherfestigkeit auf die Gleitfestigkeit bei keinem der Versuche mit dem Kies festzustellen.

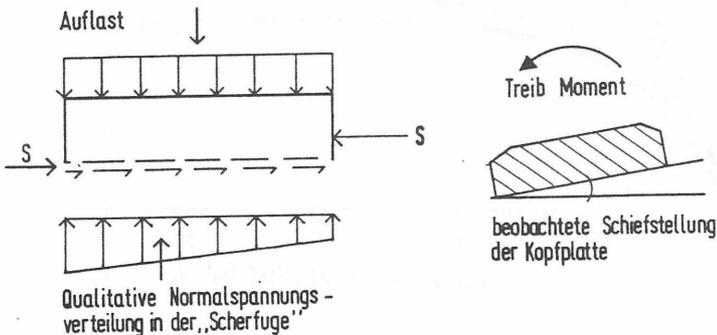


Bild 58: Veränderte Normalspannungsverteilung durch eine Schiefstellung der Kopfplatte (nach WERNICK 1978 [40])

3.5.2 Versuchsergebnisse

Für den untersuchten Feinkies lagen bei einer Normalspannung von $G_N = 160 \text{ kN/m}^2$ die maximal erreichbaren Scherfestigkeiten zwischen 70 kN/m^2 im Scherversuch mit der glatten Dichtungsbahn DB6 und 180 kN/m^2 zwischen Dichtungsbahn DB2 und Boden. Die Entwicklung der Scherfestigkeit zwischen dem Boden und den einzelnen Dichtungsbahnen über die Horizontalverschiebung ist in Bild 59 aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, daß von der glatten Dichtungsbahn DB6 und den Dichtungsbahnen mit geringer Oberflächenstrukturierung erheblich kleinere maximale Scherfestigkeiten zwischen Dichtungsbahn und Boden übertragen werden als von den Dichtungsbahnen DB1 und DB2, die eine grobe Oberflächenstruktur aufweisen.

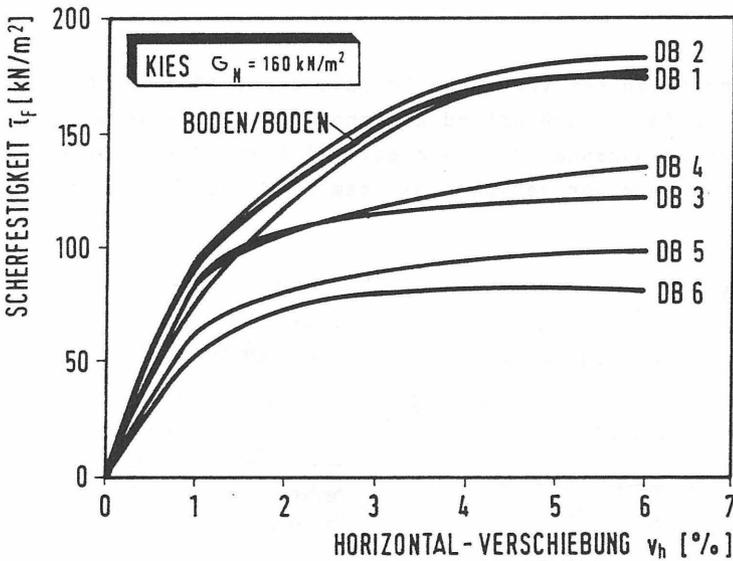


Bild 59: Scherfestigkeitsentwicklung zwischen Kies und verschiedenen Dichtungsbahnen bei einer Normalspannung von $G_N = 160 \text{ kN/m}^2$ in Abhängigkeit von der Horizontalverschiebung

In Bild 60 ist für die Versuche zwischen den Dichtungsbahnen und dem Kies das Verhältnis der Scherfestigkeit zwischen dem Boden und den Dichtungsbahnen zur Scherfestigkeit des Bodens in Abhängigkeit von der Horizontalverschiebung darstellt. Daraus geht hervor, daß von den Dichtungsbahnen DB6 und DB5 50 bis 70 % der Scherfestigkeit des Bodens erreicht werden, während von den Dichtungsbahnen DB1 und DB2 die Scherfestigkeit des Bodens erreicht oder sogar überschritten wird.

Grundsätzlich bleibt festzustellen, daß mit zunehmender Größe der Oberflächenstrukturen der Dichtungsbahnen und der damit wachsenden Verzahnung zwischen Dichtungsbahn und Boden, größere Scherkräfte vom Boden in die Dichtungsbahn übertragen werden.

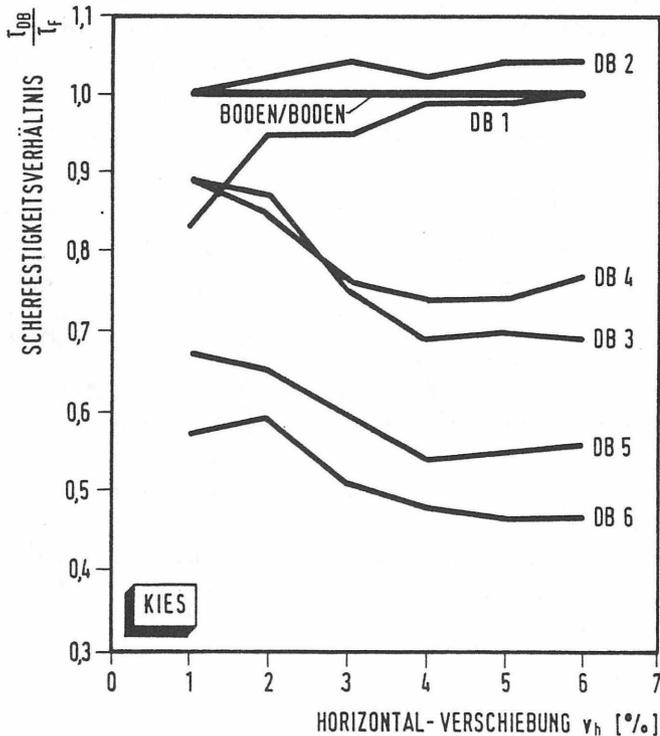


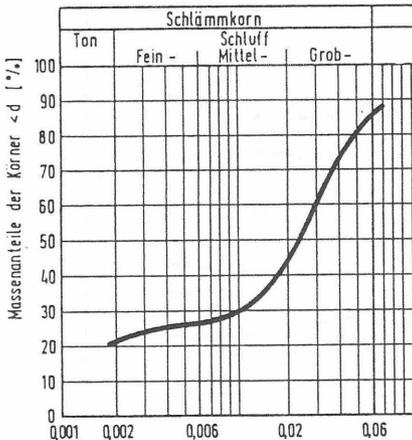
Bild 60: Verhältnis der Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahnen und Kies zur Scherfestigkeit des Kieses in Abhängigkeit von der Horizontalverschiebung

3.6 Scherversuche mit bindigen Böden

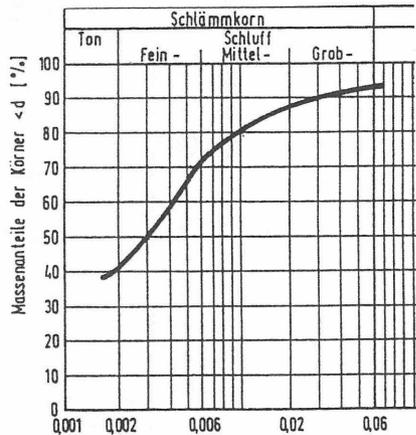
3.6.1 Verwendete Böden und Versuchsmethodik

Nach der Untersuchung von nichtbindigen Materialien, die oberhalb der Dichtungsbahn innerhalb einer Kombinationsabdichtung als Drainage-, Filter- oder Schutzschicht eingesetzt werden, erfolgt die Ermittlung des Reibungsverhaltens zwischen mineralischen Abdichtungsmaterialien, die in der Kombinationsdichtung unter der Dichtungsbahn liegen, und den bisher verwendeten Dichtungsbahnen unterschiedlicher Oberflächenstruktur.

Für die Untersuchungen wurden zwei bindige Böden ausgewählt, die als Abdichtungsmaterialien zur Abdichtung von Deponien geeignet sind. Es handelt sich um einen Schluff, mit einem Tonanteil von 20 % und einen Ton, mit einem Tonanteil von 42 %. Die Kornverteilungslinien sind in Bild 61 aufgetragen.



a. Schluff



b. Ton

Bild 61: Kornverteilungslinien nach DIN 18 123 der verwendeten bindigen Böden

In Bild 62 und Bild 63 sind die bodenmechanischen Kennwerte der untersuchten bindigen Böden zusammengestellt.

Bodenmechanische Kennwerte			Schluff
Bodenart nach DIN 4022			U, t, fs'
Ausrollgrenze	w _p	[-]	0,147
Fließgrenze	w _L	[-]	0,308
natürl. Wassergehalt	w _n	[-]	0,175
Plastizitätszahl	I _p	[-]	0,161
Konsistenzzahl	I _c	[-]	0,826
Aktivitätszahl	I _A	[-]	0,732

Bild 62: Bodenmechanische Kennwerte des Schluffs

Bodenmechanische Kennwerte			Ton
Bodenart nach DIN 4022			T, ū
Ausrollgrenze	w _p	[-]	0,169
Fließgrenze	w _L	[-]	0,565
natürl. Wassergehalt	w _n	[-]	0,275
Plastizitätszahl	I _p	[-]	0,396
Konsistenzzahl	I _c	[-]	0,732
Aktivitätszahl	I _A	[-]	0,943

Bild 63: Bodenmechanische Kennwerte des Tons

Die Bilder 64 und 65 zeigen die Proctorkurven der untersuchten bindigen Böden und für den Ton zusätzlich die modifizierte Proctordichte in Abhängigkeit vom Wassergehalt.

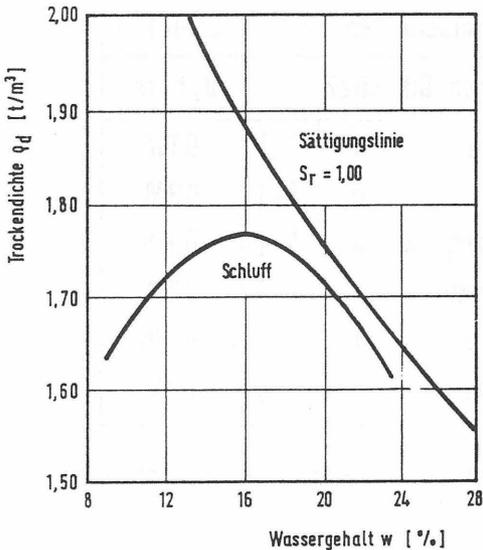


Bild 64: Proctorkurve des Schluffs

Aus der Proctorkurve des Schluffs geht hervor, dass die Proctordichte des Schluffs bei einem optimalen Wassergehalt von $w_{opt} = 16\%$ mit $\rho_{pr} = 1,77 \text{ t/m}^3$ liegt. Der Verdichtungsgrad beträgt in diesem Fall $D_{pr} = 100\%$. Für mineralische Abdichtungen wird i. a. ein Einbau des Materials mit einem Verdichtungsgrad zwischen $D_{pr} = 100\%$ und $D_{pr} = 95\%$ auf dem nassen Ast der Proctorkurve verlangt, um eine möglichst homogene und undurchlässige Bodenstruktur zu erhalten. Für einen Verdichtungsgrad von $D_{pr} = 95\%$ beträgt die erforderliche Einbaudichte $\rho_d = 1,68 \text{ t/m}^3$ bei einem Wassergehalt von $w_{95} = 21\%$. Daraus ergibt sich ein für den Einbau zulässiger Bereich des Wassergehalts von $w = 16$ bis 21% . Besonders bei schluffigen, bindigen Materialien bewirken schon relativ kleine Wassergehaltsschwankungen große Veränderungen in den bodenmechanischen Eigenschaften.

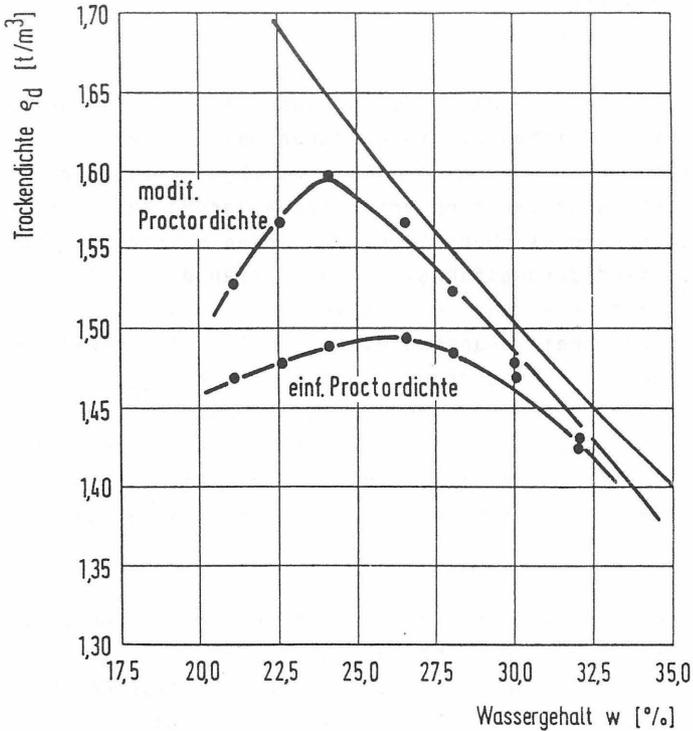


Bild 65: Proctorkurven für die einfache und modifizierte Proctordichte des Tones nach DIN 18 127.

Durch höhere Verdichtungsenergie kann im modifizierten Proctorversuch eine höhere Verdichtung erzielt werden als im einfachen Proctorversuch. Mit den heute üblichen Verdichtungsgeräten ist es möglich, auf der Baustelle einen Verdichtungsgrad von D_{pr} größer 100 % einfacher Proctordichte zu erzielen. Die einfache Proctordichte beträgt für den Ton $\rho_{pr} = 1,48 \text{ t/m}^3$ bei einem Wassergehalt von $w_{pr} = 26,5 \%$. Für einen Verdichtungsgrad von $D_{pr} = 95 \%$ auf der nassen Seite ergibt sich eine Proctordichte von $\rho_{pr95} = 1,40 \text{ t/m}^3$ bei einem Wassergehalt von $w = 33 \%$. Der für den Einbau dieses Tonmaterials günstige Wassergehaltsbereich liegt somit zwischen $w = 26,5$ und 33% .

3.6.2 Scherversuche mit bindigen Böden bei optimalem Einbauwassergehalt

Im Schergerät 10 cm * 10 cm wurde zunächst eine Versuchsserie mit den unterschiedlichen Dichtungsbahnen DB1 bis DB6 und den beiden bindigen Abdichtungsmaterialien durchgeführt. Beide Materialien unterscheiden sich erheblich aufgrund ihrer unterschiedlichen Kornzusammensetzung und ihren Wassergehalten bei optimaler Verdichtungsfähigkeit und lassen daher ein grundsätzlich verschiedenes Reibungsverhalten erwarten. Die Böden wurden dabei annähernd mit optimalem Proctorwassergehalt und einem Verdichtungsgrad von mindestens $D_{pr} = 100\%$ in den oberen Scherrahmen des Gerätes eingebaut, während jeweils im unteren Scherrahmen die zu untersuchende Dichtungsbahn derart eingebaut war, daß ihre geschlossene Oberfläche genau in der vorgegebenen Scherfläche zwischen oberem und unterem Scherrahmen lag.

Die Normalspannungen der drei durchgeführten Teilversuche betragen jeweils $\sigma_N = 50, 100$ und 150 kN/m^2 . Um die durch die Lastaufbringung möglicherweise entstehenden Porenwasserüberdrücke abzubauen, wurden die Proben 24 h unter der jeweiligen Normalspannung konsolidiert. Außerdem sollte dadurch gewährleistet werden, daß eine vollflächige Verbindung zwischen der Dichtungsbahn und dem eingebauten Boden erreicht wird. Durch die Aufnahme von Zeitsetzungslinien während der Konsolidierungsphase wurde festgestellt, daß die Konsolidierungsphase nach 24 h abgeschlossen war. Die Versuchsgeschwindigkeit betrug $v = 0,025 \text{ mm/min}$, um das Auftreten von Porenwasserdrücken während des Abschervorgangs möglichst zu vermeiden.

In den Bildern 66 und 67 sind die Scherfestigkeits - Normalspannungsdiagramme für die Versuche mit den unterschiedlichen Dichtungsbahnen für den untersuchten Schluff und Ton dargestellt.

3.6.2.1 Versuchsergebnisse mit Schluff

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß bei den Dichtungsbahnen mit starken und mäßig starken Oberflächenprofilierungen der Reibungswinkel des Schluffs zwischen Dichtungsbahn und Boden dem Reibungswinkel des Bodens annähernd entspricht, die Adhäsion zwischen der Dichtungsbahn und dem Boden jedoch nur etwa ein Drittel der Kohäsion des Bodens erreicht. Bei den schwach profilierten Dichtungsbahnen DB5 und DB6 nehmen dagegen auch die Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden ab. In der Zusammenstellung der Versuchsergebnisse (Bild 68) sind die Reibungswinkel und die Kohäsion des Bodens bzw. die Adhäsion zwischen den Dichtungsbahnen und Boden angegeben.

Da der zur Gesamtscherfestigkeit beitragende konstante Anteil der Kohäsion bzw. Adhäsion mit Zunahme der Normalspannung immer weniger Einfluß auf die Gesamtscherfestigkeit hat, ist es darüber hinaus notwendig, das Verhältnis der erreichbaren Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn zur Scherfestigkeit des Bodens in Abhängigkeit von der Normalspannung darzustellen. Gewählt wurden für die Zusammenstellung der Ergebnisse in Bild 68 $G_N = 25 \text{ kN/m}^2$ und $G_N = 200 \text{ kN/m}^2$.

$$M_v = \frac{G_N * \tan d' + a'}{G_N * \tan \rho' + c'}$$

Dabei ist M_v das Verhältnis der Scherfestigkeiten zwischen Dichtungsbahn und Boden zur Scherfestigkeit des Bodens bei bindigen Böden.

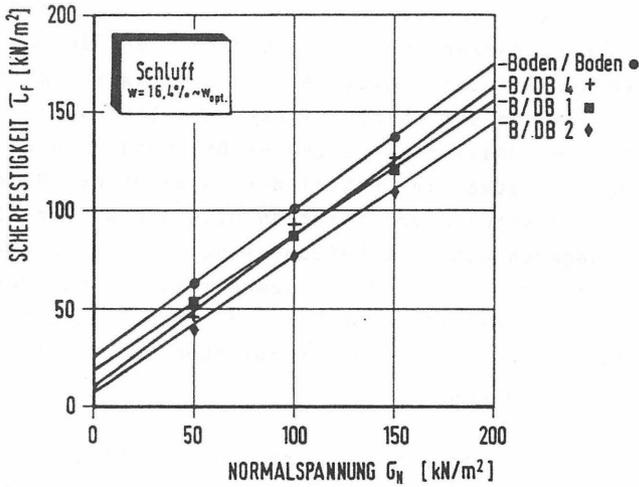


Bild 66: Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm für verschiedene Dichtungsbahnen und Schluff

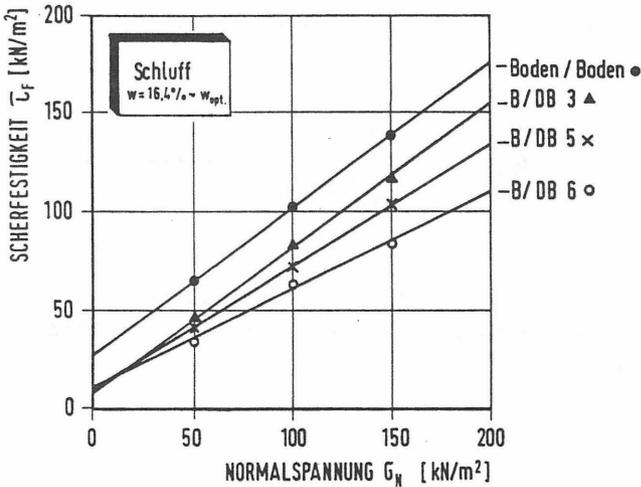


Bild 67: Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm für verschiedene Dichtungsbahnen und Schluff

Versuchsergebnisse mit Schluff				
	φ', δ' [°]	c', α' [KN/m ²]	$\mu_{V 25}$ [-]	$\mu_{V 200}$ [-]
Boden/Boden	37,5	27,0	1,00	1,00
Boden/DB 1	33,1	19,5	0,77	0,83
Boden/DB 2	34,1	8,2	0,54	0,80
Boden/DB 3	35,7	8,9	0,58	0,87
Boden/DB 4	36,7	11,7	0,66	0,89
Boden/DB 5	31,8	9,7	0,55	0,74
Boden/DB 6	26,0	11,1	0,50	0,60

Bild 68: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse mit dem Schluff; $w = 16,4 \% \sim w_{opt}$

3.6.2.2 Scherversuche mit Ton

Bei der Durchführung der Scherversuche mit dem Ton und den verschiedenen Dichtungsbahnen betrug die Einbaudichte $\rho_{pr} = 1,55 \text{ t/m}^3$ bei einem Wassergehalt von etwa $w = 27 \%$. Das entspricht einem Verdichtungsgrad von $D_{pr} = 97 \%$ modifizierter Proctordichte oder einem Verdichtungsgrad von über 100 % einfacher Proctordichte. In den Bilder 69 und 70 sind die Scherspannungs-/Normalspannungsdiagramme der Versuche mit dem Ton dargestellt.

3.6.2.4 Versuchsergebnisse mit Ton

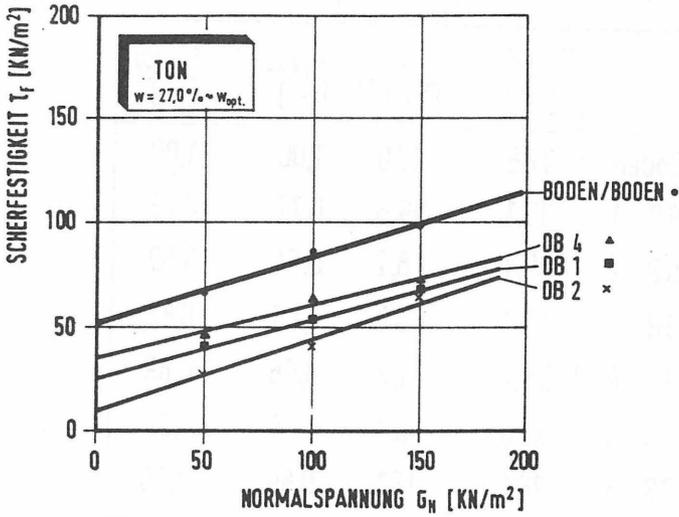


Bild 69: Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm für verschiedene Dichtungsbahnen und Ton

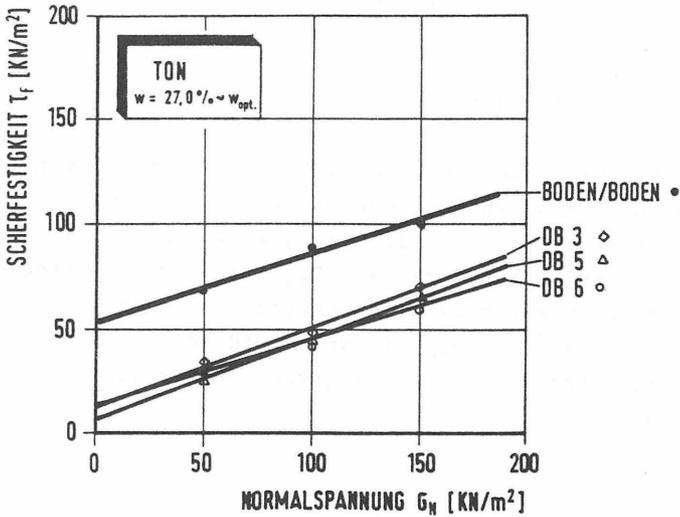


Bild 70: Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm für verschiedene Dichtungsbahnen und Ton

Die in Bild 71 zusammengestellten Ergebnisse zeigen, daß die Reibungswinkel wie bereits bei den Versuchen mit dem Schluff leicht schwanken, jedoch besonders der Adhäsionsanteil, zwischen Dichtungsbahnen und Boden deutlich geringer ist als die Kohäsion des Bodens selbst. Die Verhältnisse der Scherfestigkeiten schwanken besonders bei den kleinen Auflasten, da sie in diesem Bereich überwiegend durch den Kohäsions- oder Adhäsionsanteil bestimmt werden. Sie betragen zwischen 30 und 68 % der Scherfestigkeit des Bodens. Im Bereich hoher Auflasten überwiegt der Anteil aus Reibung. Die Scherfestigkeiten zwischen Dichtungsbahnen und Boden betragen in diesem Bereich 60 bis 70 % der Scherfestigkeit des Bodens.

Versuchsergebnisse mit Ton				
	φ', δ' [°]	c', a' [KN/m ²]	M_{v25} [-]	M_{v200} [-]
Boden/Boden	17,5	55,0	1,00	1,00
Boden/DB 1	15,5	25,0	0,51	0,68
Boden/DB 2	17,5	12,5	0,32	0,64
Boden/DB 3	18,8	12,5	0,33	0,68
Boden/DB 4	14,5	36,0	0,67	0,74
Boden/DB 5	18,5	12,5	0,33	0,67
Boden/DB 6	17,0	8,0	0,25	0,58

Bild 71: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse mit dem Ton; $w = 27 \% \sim w_{opt}$

3.6.3 Einfluß des Wassergehaltes auf die Scherfestigkeit zwischen einer glatten Kunststoffdichtungsbahn und bindigen Böden

3.6.3.1 Versuchsbedingungen

Für den Einbau einer mineralischen Abdichtung sind Einbauwassergehalte auf dem nassen Ast der Proctorkurven zugelassen. Aus diesem Grunde wurde eine Versuchsserie durchgeführt, die den Einfluß der Wassergehalte auf die Scherfestigkeit der bindigen Böden und die Scherfestigkeit zwischen diesen und glatten Kunststoffdichtungsbahnen aufzeigen soll. Die für die Versuche gewählten Einbauwassergehalte und Einbaudichten entsprachen annähernd den Werten der zugehörigen Proctorkurven für die einfache Proctordichte. Sie wurden im einem Bereich zwischen 100 und 95 % der Proctordichte auf dem nassen Ast variiert. Bei den Versuchen mit Schluff wurden beispielhaft auch Versuche mit Einbauwassergehalten auf dem trockenen Ast der Proctorkurve ausgeführt. Die Auflasten betragen bei dieser Versuchsserie 12,5 , 25 und 50 kN/m². Für Einbauwassergehalte auf dem nassen Ast der Proctorkurve wurden zusätzlich Versuche mit Auflasten von 100, 150 und 200 kN/m² durchgeführt. Die Konsolidierungszeiten betragen jeweils 24 Stunden, die Schergeschwindigkeit 0,025 mm/min. Bei den Versuchen mit dem Schluff betragen die Wassergehalte $w = 12,1 \%$, $14,3 \%$, $16,4 \%$, $18,4 \%$ und $20,9 \%$. Die Einbauwassergehalte der Versuche mit Ton wurden nur auf dem nassen Ast der Proctorkurve mit $w = 26,1 \%$, $29,9 \%$ und $32,9 \%$ eingestellt. Die Proben wurden mit einfacher Proctorenergie verdichtet und anschließend in das Schergerät eingebaut. Durch das Einstellen des entsprechenden Wassergehaltes für eine größere Probenmenge und deren Lagerung in geschlossenen Behältern wurde versucht, die für einen Scherversuch erforderlichen Teilverversuche jeweils mit annähernd gleichem Einbauwassergehalt auszuführen. Eine gewisse Schwankungsbreite der Einbauwassergehalt ließ sich jedoch nicht vermeiden, sie betrug 0,3 % um den jeweils angegebenen Wassergehalt.

3.6.3.2 Versuchsergebnisse mit Schluff

In Bild 72 sind die Schergeraden des Schluffs für verschiedene Einbauwassergehalte dargestellt.

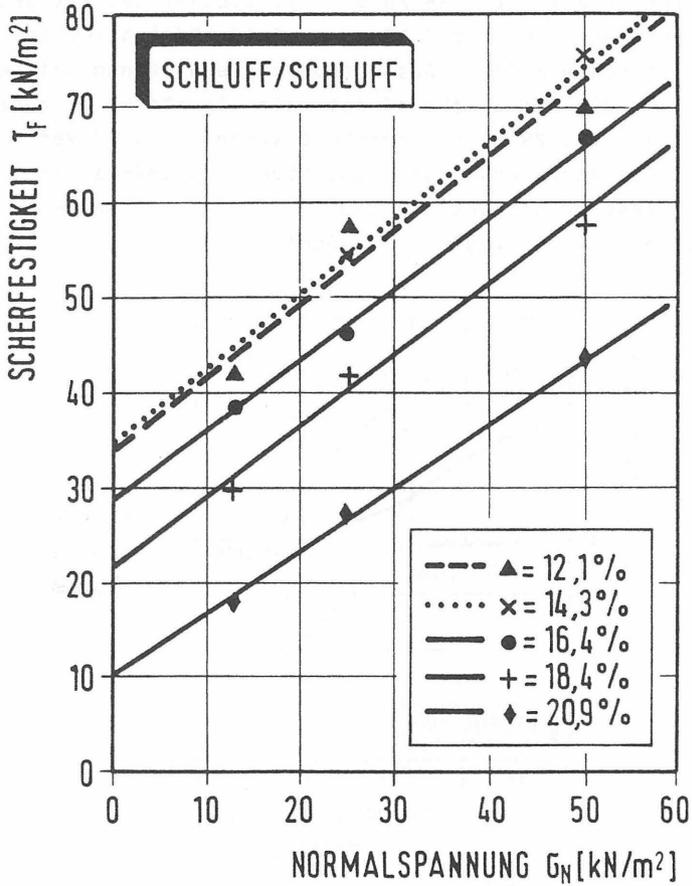


Bild 72: Scherfestigkeit des Schluffs bei verschiedenen Wassergehalten im Bereich kleiner Auflasten

Die Versuche mit dem reinen Schluff lassen den Einfluß des Wassergehaltes auf die erreichbare Scherfestigkeit des Bodens bereits deutlich werden. Der Reibungswinkel des Schluffs wird nur unwesentlich beeinflusst, die Abnahme der Kohäsion mit zunehmendem Wassergehalt ist jedoch deutlich zu erkennen. Bei geringen Wassergehalten von 12 und 14 % ergibt sich für den Schluff eine Kohäsion von 35 kN/m^2 . Mit Zunahme des Wassergehaltes verringert sich die Kohäsion auf 10 kN/m^2 bei einem Wassergehalt von $w = 21 \%$. Das entspricht etwa einem Drittel der Kohäsion, die bei annähernd optimalem Proctorwassergehalt von $w = 16,4 \%$ mit 29 kN/m^2 ermittelt wurde. Bild 73 veranschaulicht die Veränderung der Konsistenz des Bodens mit zunehmendem Wassergehalt und die damit verbundene Abnahme der übertragbaren Scherfestigkeit des Schluffs.

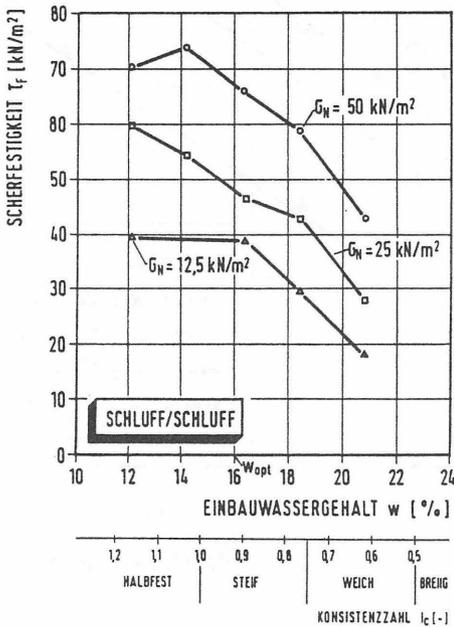


Bild 73: Abhängigkeit der Scherfestigkeit des Schluffs vom Wassergehalt und der Änderung der Konsistenz

Die Veränderungen des Reibungsverhaltens zwischen glatten Kunststoffdichtungsbahnen und dem Schluff in Abhängigkeit vom Wassergehalt ist den Diagrammen in Bild 74 zu entnehmen.

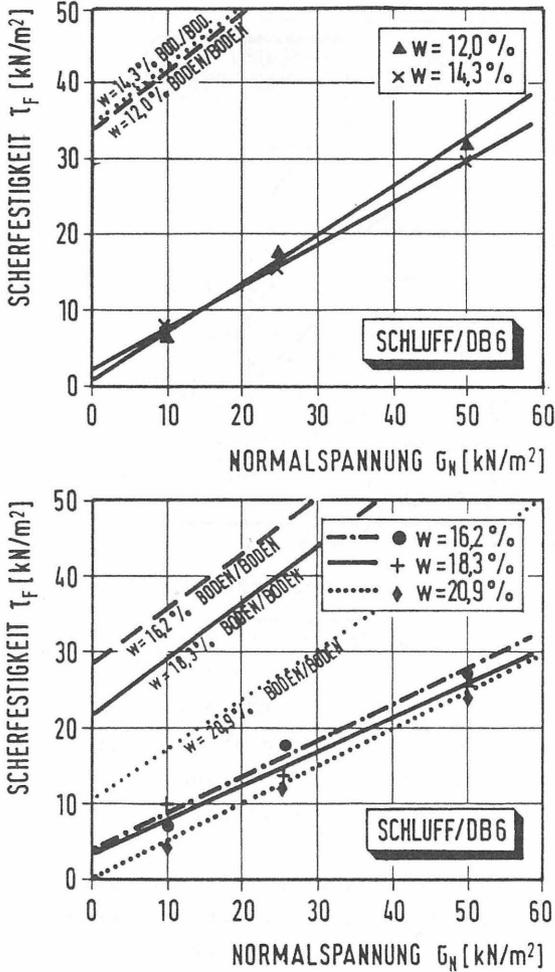


Bild 74: Scherfestigkeit zwischen glatten Kunststoffdichtungsbahnen und Schluff in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Die übertragbare Scherfestigkeit zwischen der glatten Kunststoffdichtungsbahn und dem Schluff in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von der damit verbundenen Änderung der Konsistenz zeigt Bild 75.

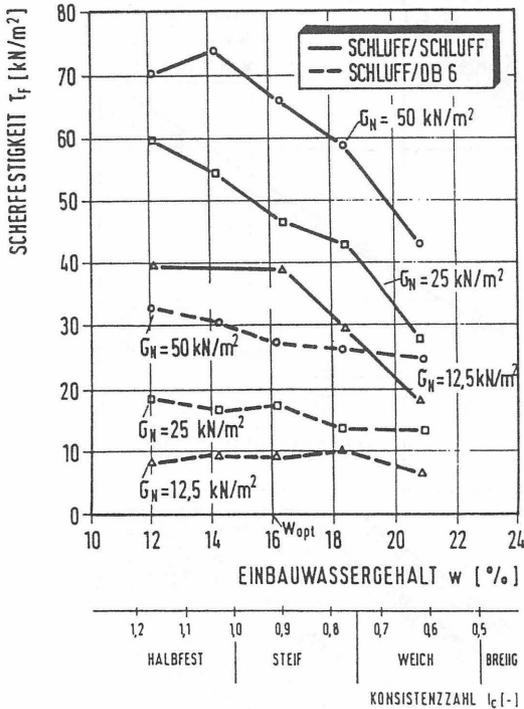


Bild 75: Scherfestigkeit zwischen glatter Kunststoffdichtungsbahn und Schluff in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Konsistenz

Besonders deutlich war die Abnahme der Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Schluff bei den Teilversuchen mit einer Auflast von 50 kN/m^2 zu erkennen, während bei einer Auflast von nur $12,5 \text{ kN/m}^2$ diese Tendenz nicht mehr zu beobachten war. Ein Grund dafür ist sicher in dem geringeren Pressverbund zwischen Dichtungsbahn und Boden zu suchen.

Bei geringem Wassergehalt und halbfester Konsistenz ergibt sich bei kleinen Auflasten kein vollständiger Flächenkontakt mit der Dichtungsbahn und damit eine geringere Adhäsion. Diese nimmt mit zunehmendem Wassergehalt bei steifer Konsistenz zu. Die Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden steigt leicht an. Geht der Boden in eine weiche Konsistenz über, nimmt die Scherfestigkeit wieder ab. Aus der Darstellung der Veränderung der Reibungswinkel und der Kohäsion bzw. Adhäsion in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Veränderung der Konsistenz ist in Bild 76 dieses Verhalten zu erkennen.

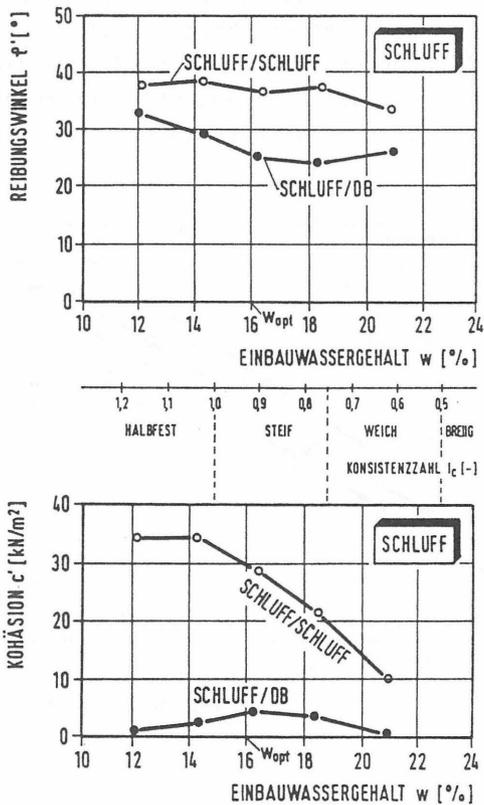


Bild 76: Abhängigkeit von Reibungswinkel und Kohäsion vom Wassergehalt und der Konsistenzänderung

Bleibt der Reibungswinkel des Bodens durch die Wassergehaltsänderung auch weitgehend konstant, so nimmt der Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden mit zunehmendem Wassergehalt zunächst ab, und nimmt dann ebenfalls einen annähernd konstanten Wert an, der jedoch deutlich unter dem Reibungswinkel des Bodens selbst liegt. Die Kohäsion des Bodens nimmt bei Zunahme des Wassergehaltes deutlich ab, während die Adhäsion zwischen Boden und Dichtungsbahn im Bereich des optimalen Proctorwassergehaltes einen deutlichen Größtwert annimmt. Die Adhäsion beträgt in diesem Bereich 5 kN/m^2 , das entspricht nur ca. 20 % der Kohäsion des Bodens, die in diesem Fall 28 kN/m^2 erreicht. Weitere Versuche wurden bei verschiedenen Wassergehalten und höheren Auflasten von 100, 150 und 200 kN/m^2 durchgeführt. In Bild 77 sind die Schergeraden für den Schluff über den gesamten untersuchten Auflastbereich bei verschiedenen Wassergehalten aufgetragen.

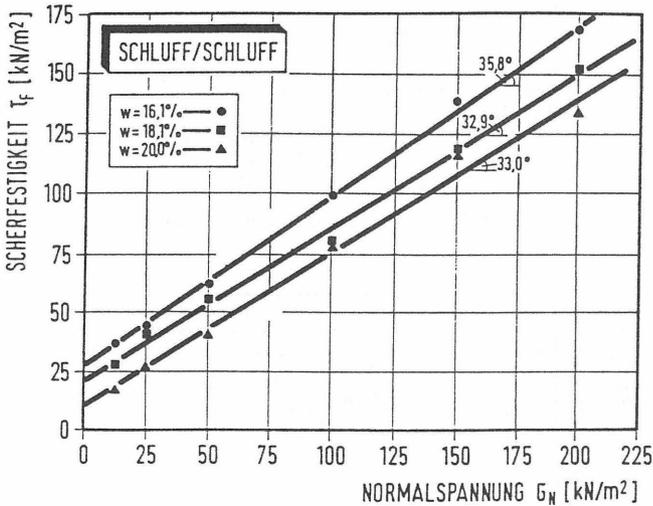


Bild 77: Schergeraden des Schluffs für verschiedene Wassergehalte

Bild 78 stellt die ermittelten Schergeraden der Versuche mit verschiedenen Wassergehalten zwischen der glatten Dichtungsbahn DB6 und Schluff für den gesamten Auflastbereich dar.

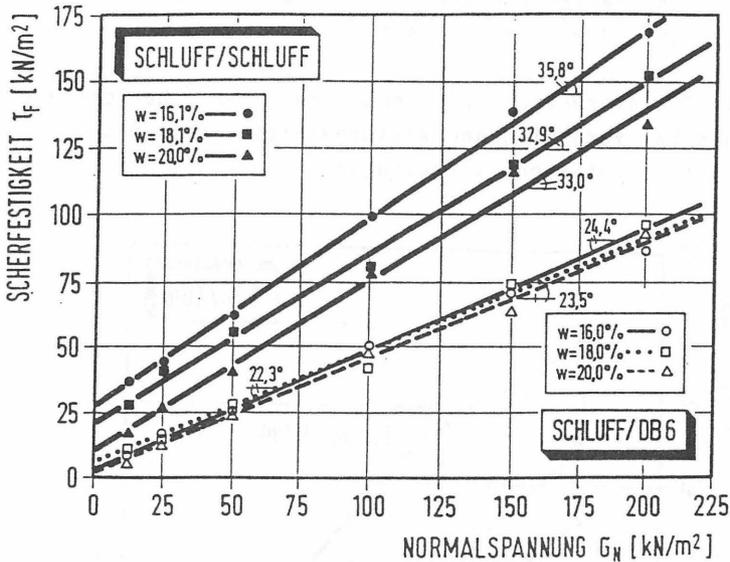


Bild 78: Scherfestigkeiten zwischen Dichtungsbahn DB6 und Schluff bei unterschiedlichen Wassergehalten

Aus Bild 78 ist zu ersehen, daß die Reibungswinkel des Schluffs unter Berücksichtigung der Versuchsgenauigkeit im untersuchten Bereich nahezu unabhängig vom Wassergehalt des Bodens sind. Für den Reibungswinkel zwischen der Dichtungsbahn und dem Boden trifft diese Feststellung ebenfalls zu; der Reibungswinkel beträgt jedoch nur ca. 2/3 vom Reibungswinkel des Bodens selbst. Der Einfluß der Wassergehaltsänderung auf die Größe der Kohäsion des Bodens ist dagegen deutlich zu erkennen. Eine Erhöhung des Wassergehaltes um nur jeweils 2 % bewirkt eine Abnahme der Kohäsion auf zunächst ca. 55 % und anschließend auf 30 % der Kohäsion des Bodens bei optimalem Wassergehalt. Die Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Schluff geht mit zunehmendem Wassergehalt des Bodens gänzlich verloren.

3.6.3.3 Versuchsergebnisse mit Ton

Für den Ton wurde ebenfalls eine Versuchsserie mit unterschiedlichen Wassergehalten und Auflasten im Bereich zwischen 12,5 und 200 kN/m² durchgeführt.

Im Bild 79 ist zunächst die Veränderung der Scherfestigkeit des Tons bei verschiedenen Wassergehalten und damit veränderter Konsistenz aufgetragen.

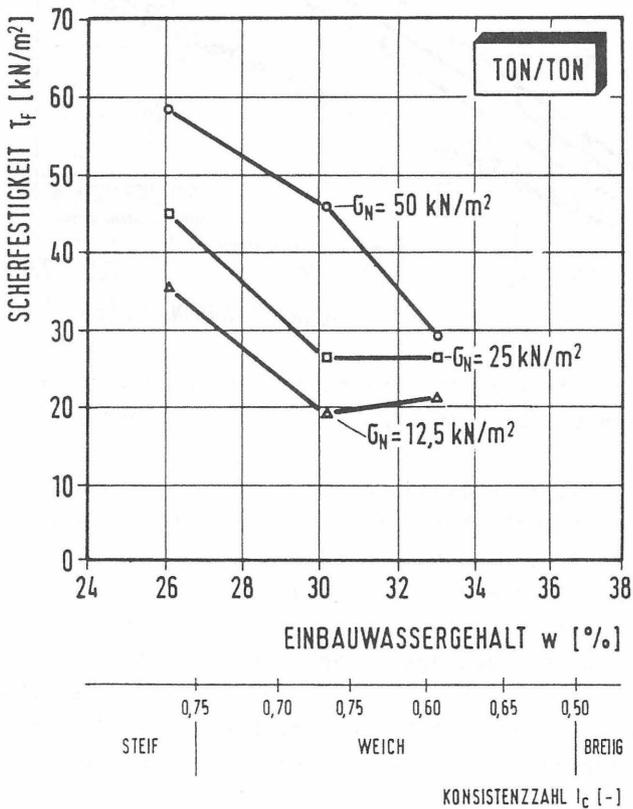


Bild 79: Scherfestigkeit des Tons in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Konsistenz

Auch bei den Versuchen mit dem Ton nehmen die erreichbaren Scherfestigkeiten mit dem Anstieg des Wassergehaltes ab. Im Bereich kleiner Auflasten und weicher Konsistenz des Bodens war diese Abnahme nicht mehr feststellbar. Hier können versuchsbedingte Einflüsse eine Rolle spielen.

Die beiden Diagramme in Bild 80 zeigen die Schergeraden des Tons und die Schergeraden der Versuche zwischen Ton und der glatten Dichtungsbahn DB6.

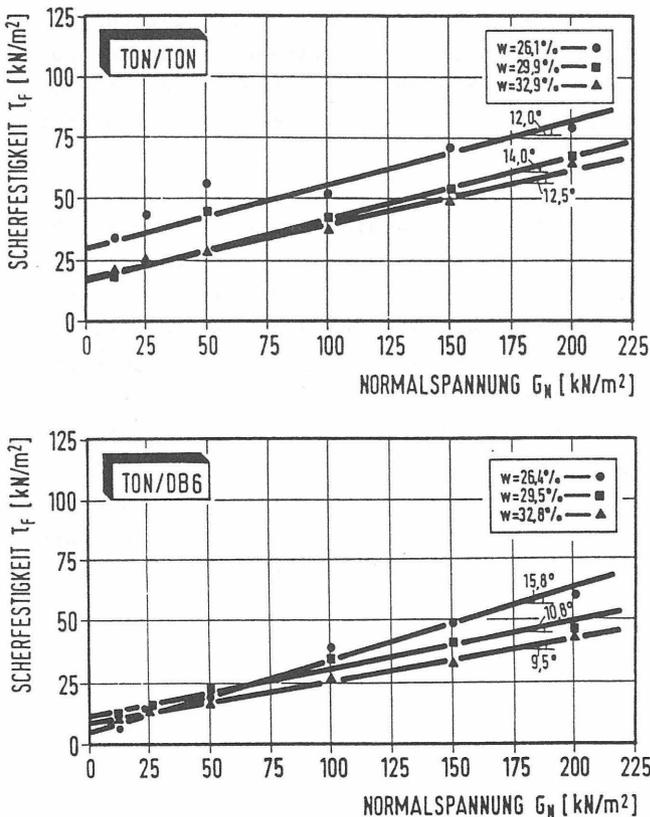


Bild 80: Schergeraden der Versuche mit Ton und zwischen glatter Dichtungsbahn DB6 und Ton bei verschiedenen Wassergehalten

Die Reibungswinkel des Tons weisen bei der Änderung des Wassergehaltes leichte Schwankungen auf, können aber im Rahmen der Versuchsgenauigkeit durchaus als konstant und im untersuchten Bereich als unabhängig vom Wassergehalt angesehen werden. Die Kohäsion des Bodens bei nahezu optimalem Einbauwassergehalt und steifer Konsistenz liegt bei etwa 30 kN/m^2 und nimmt bei Zunahme des Wassergehaltes deutlich auf die Hälfte ab. Eine weitere Wassergehaltssteigerung um 3 % bewirkte jedoch keine weitere Abnahme der Kohäsion.

Bei den Versuchen zwischen dem Ton und der glatten Dichtungsbahn nahmen die Reibungswinkel zwischen dem Boden und der Dichtungsbahn mit zunehmendem Wassergehalt leicht ab. Sie entsprechen in der Größenordnung jedoch dem Reibungswinkel des Bodens.

Die Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden erreichte bei steifer Konsistenz den geringsten Wert von ca. 5 kN/m^2 . Diese geringe Adhäsion im Vergleich zur Kohäsion des Bodens selbst ist auf die steife Konsistenz des Bodens zurückzuführen, die einem gleichmäßig sattem Anliegen auf der Dichtungsbahnoberfläche entgegensteht. Bei weicher Konsistenz des Bodens nahm die Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden leicht zu. Sie entspricht aber annähernd der Kohäsion des Bodens bei dieser Konsistenz und den zugehörigen Wassergehalten. Die Veränderung des Reibungswinkels und der Kohäsion bzw. Adhäsion bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten ist in Bild 81 aufgetragen.

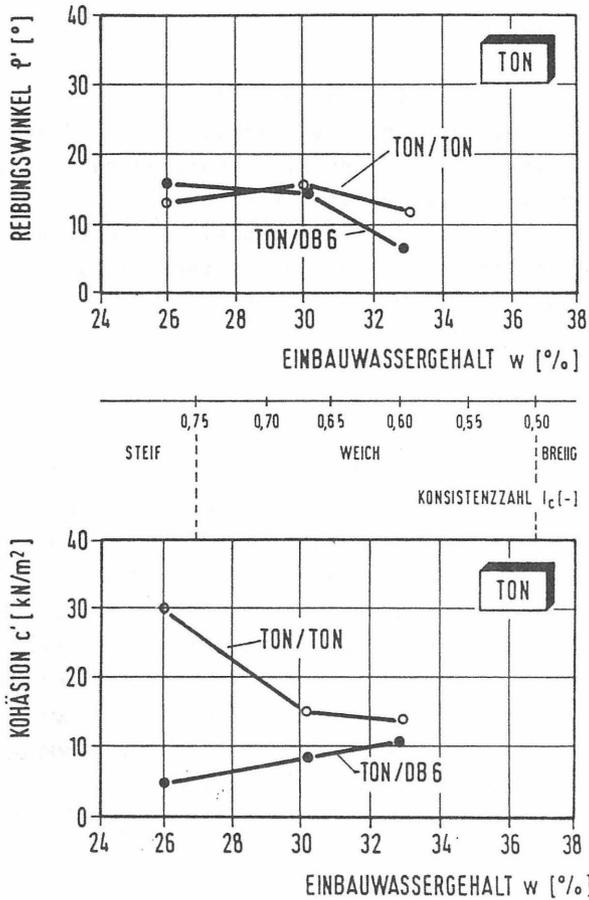


Bild 81 : Scherparameter des Tons und zwischen Dichtungsbahn DB 6 und Ton in Abhängigkeit vom Wassergehalt

3.6.4 Einfluß kurzfristiger hoher Belastungen

3.6.4.1 Vorbemerkung

Um den Einfluß kurzzeitiger hoher Belastungen, die in der Bauphase durch das Befahren der Dichtungsbahn während des Aufbringens des nichtbindigen Flächendränagematerials aus den Radlasten und Bremskräften entstehen und über die Dichtungsbahn an die mineralische Dichtungsschicht übertragen werden müssen, zu simulieren, wurde eine weitere Versuchsserie im Schergerät 30 cm * 30 cm durchgeführt.

3.6.4.2 Versuchsmethodik

Die Auflasten der jeweils durchgeführten drei Teilversuche betragen 80, 160 und 240 kN/m². Die Versuchsgeschwindigkeit wurde für die bindigen Materialien bewußt mit 1,0 mm/min gewählt, um eventuell auftretende Porenwasserdrücke zu simulieren. Da die Kastenschervergeräte grundsätzlich nicht für eine Messung der Porenwasserdrücke konzipiert sind, wurde diese nicht vorgenommen. Weiterhin wurde die Konsolidationszeit auf eine Stunde nach dem Einbau der Proben bei optimalem Wassergehalt verkürzt. Damit sollten erste Setzungen, die durch den Ausgleich von Unebenheiten direkt nach Aufbringen der Last entstehen, vorweggenommen werden und ein Anliegen zwischen Dichtungsbahn und Boden gewährleistet sein. Durchgeführt wurden die Versuche mit Schluff und Ton, wobei der Boden selbst, Boden gegen Dichtungsbahn DB1 und gegen die glatte Dichtungsbahn DB6 abgesichert wurde.

3.6.4.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind in den Bildern 82 und 83 als Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm für die Versuche mit Schluff und Ton und den untersuchten Dichtungsbahnen dargestellt.

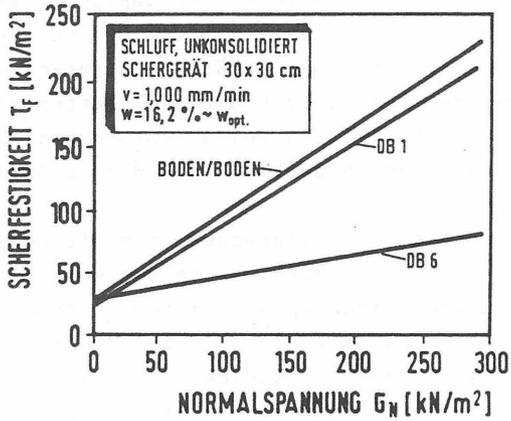


Bild 82: Versuchsergebnis bei schneller hoher Belastung mit Schluff; $w = 16,2\% - w_{opt}$

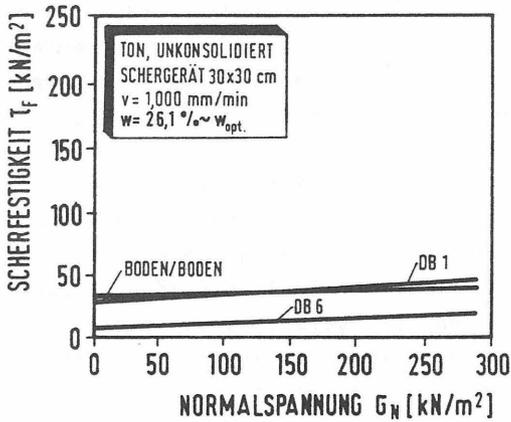


Bild 83: Versuchsergebnis bei schneller hoher Belastung mit Ton; $w = 26,1\% - w_{opt}$

Die Versuchsergebnisse mit dem Schluff ergaben für den Boden einen Reibungswinkel von 33 Grad und eine Kohäsion $c' = 26 \text{ kN/m}^2$. Der Reibungswinkel zwischen der genoppten Dichtungsbahn DB1 und dem Boden erreichte mit $\phi' = 32$ Grad nahezu den Reibungswinkel des Bodens. Die Adhäsion entsprach der Kohäsion des Bodens. Bei dem Versuch mit der glatten Dichtungsbahn DB6 blieb die Adhäsion in vollem Umfang erhalten, der Reibungswinkel nahm jedoch deutlich auf $\phi' = 10$ Grad ab.

Bei den Versuchen mit Ton entsprechen sich die Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden sowie der Reibungswinkel des Bodens selbst. Beide Reibungswinkel liegen jedoch mit ca. 3 Grad deutlich unter den im konsolidierten Zustand ermittelten Werten von 12 bis 15 Grad. Entspricht die Adhäsion im Versuch mit der genoppten Dichtungsbahn und dem Ton noch in etwa der Kohäsion des Bodens, so ist eine deutliche Abnahme der Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden zu verzeichnen. Für diese geringe Adhäsion können zwei Gründe angeführt werden: Entweder wird aus dem Boden durch die hohen Auflasten und das schnelle Abscheren Wasser aus dem Boden ausgedrückt und es bildet sich ein Wasserfilm zwischen Dichtungsbahn und Boden, der die Reibung und Adhäsion vermindert, oder der Boden weist eine zu steife Konsistenz auf, so daß ein sattes Anliegen zwischen Boden und Dichtungsbahn aufgrund der kurzen Konsolidierungszeit noch nicht stattgefunden hat.

Die Versuche verdeutlichen, daß hohe kurzfristige Belastungen besonders bei stark bindigen Böden das Reibungsverhalten des Bodens und das Reibungsverhalten zwischen glatten Dichtungsbahnen und Boden erheblich beeinflussen können. Dabei sollte berücksichtigt werden, daß selbst durch starke Oberflächenprofilierungen maximal die Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden erreicht werden kann, die der Scherfestigkeit des Bodens entspricht.

3.7 Herausziehversuche

3.7.1 Versuchsmethodik

Herausziehversuche stellen eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des Reibungsverhaltens zwischen Dichtungsbahnen und Böden dar. Im Gegensatz zum direkten Scherversuch wird bei den Herausziehversuchen nicht der Boden gegen die Dichtungsbahn verschoben, sondern die Dichtungsbahn durch Herausziehen aus dem Boden gegen diesen verschoben. Dazu wird die Dichtungsbahn derart in den Versuchsstand eingebaut, daß sich an ihrer Ober- und Unterseite der zu untersuchende Boden befindet. Anschließend wird der Boden vertikal belastet und die Dichtungsbahn aus dem Boden herausgezogen. Die hierfür erforderliche Zugkraft wird ermittelt; sie muß den an der Ober- und Unterseite wirkenden Reibungskräften zwischen Dichtungsbahn und Boden entsprechen. Bild 84 zeigt die angenommene Kräfteverteilung im Herausziehversuch.

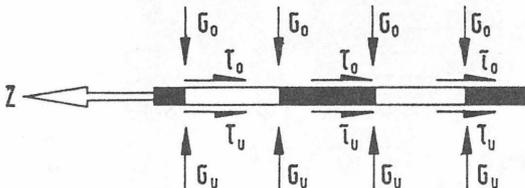


Bild 84: Angenommene Kräfteverteilung im Herausziehversuch

Die Versuche wurden in einem großformatigen Versuchsgerät von 50 cm * 50 cm ausgeführt (siehe Bild 85). Der Vorteil solcher Herausziehversuche besteht in der Möglichkeit an der Ober- und Unterseite der Dichtungsbahn jeweils ein anderes Bodenmaterial einzubauen und somit gleichzeitig das Reibungsverhalten zwischen verschiedenen Materialien zu untersuchen.

Der entscheidende Nachteil bei solchen Herausziehversuchen besteht darin, daß Zugkräfte in die Dichtungsbahn eingeleitet werden müssen, um diese aus dem Boden herauszuziehen. Um während des Versuches plastische Verformungen der Dichtungsbahn zu vermeiden, dürfen die Zugspannungen in der Dichtungsbahn die Streckgrenze des Materials nicht überschreiten. Ausgehend

von einer 200 mm breiten und 2,0 mm starken HDPE - Dichtungsbahn mit einer Streckgrenze von 15 N/mm^2 ergibt sich eine maximal einleitbare Zugkraft von $Z_{\text{max}} = 6 \text{ KN}$. Bei einer konstanten Fläche von $0,2 \text{ m}^2$ ergibt sich eine maximal übertragbare Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden zu $\tau_{\text{max}} = 30 \text{ KN/m}^2$. Wird zwischen Boden und Dichtungsbahn eine größere Scherfestigkeit erzeugt, wird die Streckspannung der Dichtungsbahn überschritten und sie verformt sich zunehmend plastisch. Aus diesem Grund führten diese großformatigen Zugversuche im Bereich hoher Auflasten nicht zum Erfolg.

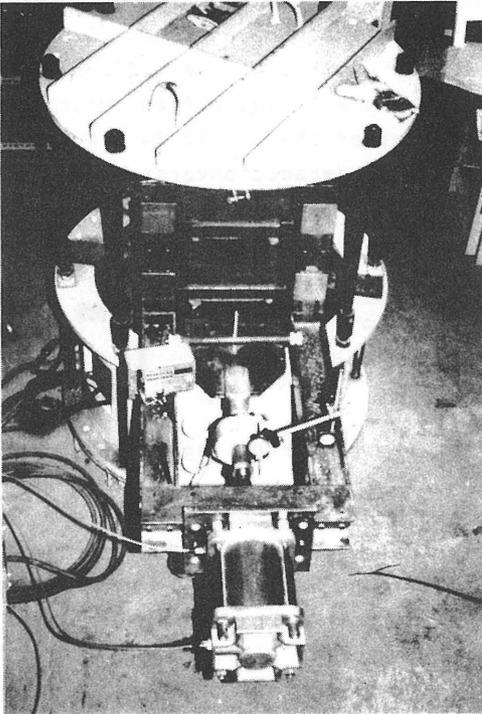


Bild 85: Aufbau des Versuchsstandes für Herausziehversuche

3.7.2 Versuchsergebnisse

Beispielhaft sind daher nur zwei Versuchsergebnisse im Bereich kleiner Auflasten dargestellt. Bild 86 zeigt das Scherspannungs-/ Normalspannungsdiagramm für Versuche mit dem bereits bekannten Tonmaterial an Ober- und Unterseite der Dichtungsbahn DB5.

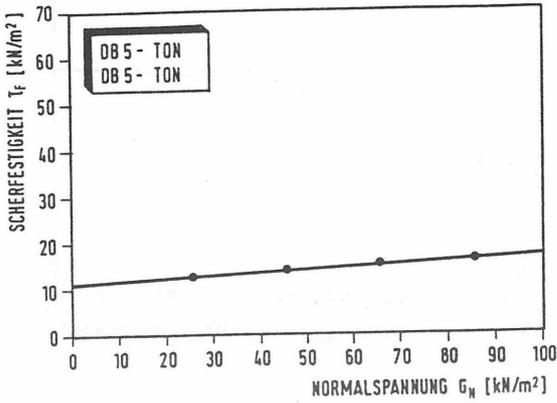


Bild 86: Scherspannungs- / Normalspannungsdiagramm von Zugversuchen mit der Dichtungsbahn DB5 und beidseitig Ton

In Bild 87 ist das Scherspannungs-/ Normalspannungsdiagramm von Zugversuchen mit unterschiedlichen Böden an der Ober- und Unterseite der Dichtungsbahn DB4 dargestellt. Deutlich geht aus diesem Diagramm hervor, daß bis zum Erreichen der maximal übertragbaren Scherfestigkeit von 30 kN/m^2 ein linearer Zusammenhang zwischen der Scherfestigkeit und der Auflast vorhanden ist. Wird jedoch die Auflast gesteigert, übersteigt die für das Herausziehen der Dichtungsbahn erforderliche Zugkraft die Streckgrenze des Dichtungsbahnmaterials, wodurch die Verformungen der Dichtungsbahn steigen. Eine weitere Steigerung der übertragbaren Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn war nicht gegeben. Die Zugversuche sind aus diesem Grunde nur für Versuche im Bereich kleiner Auflasten geeignet.

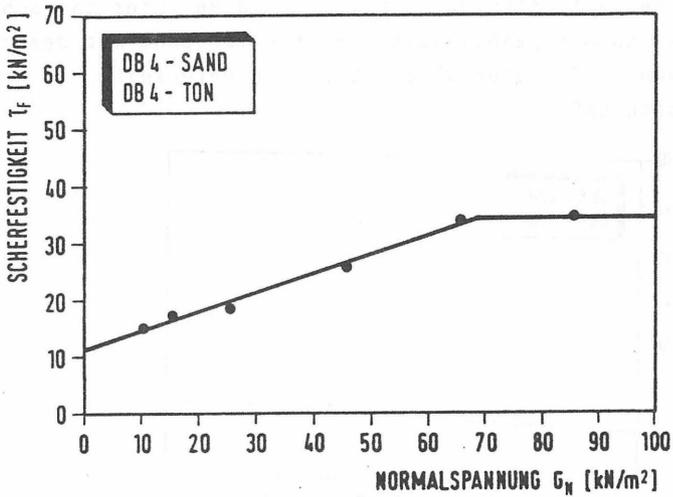


Bild 87: Scherspannungs-/ Normalspannungsdiagramm von Zugversuchen mit verschiedenen Böden und der Dichtungsbahn DB4

Eine Vielzahl weiterer Versuche mit verschiedenen Dichtungsbahnen führte zu ähnlichen Ergebnissen. Auf die Darstellung und Interpretation der restlichen Ergebnisse wird, wegen der oben beschriebenen Nachteile, an dieser Stelle verzichtet. Zur Vermeidung dieser Nachteile ist eine modifizierte Versuchsdurchführung denkbar. Die Dichtungsbahnen könnten vollflächig auf Stahlbleche aufgeklebt werden, um ein Überdehnen der Dichtungsbahn im Zugkrafteinleitungsbereich zu vermeiden. Wegen des hohen Versuchsaufwandes konnte eine solche Versuchsserie bisher noch nicht realisiert werden.

3.8 Reibungsverhalten zwischen Geotextilien, Böden und glatten Kunststoffdichtungsbahnen

3.8.1 Versuchsmethodik

Um das Reibungsverhalten zwischen Geotextilien und Böden sowie zwischen Geotextilien und der glatten Kunststoffdichtungsbahn DB6 zu untersuchen, wurden einige Scherversuche im 10 cm x 10 cm Schergerät durchgeführt.

3.8.1.1 Verwendete Geotextilien

Für die Untersuchungen wurden zwei verschiedene Geotextilien, ein verfestigter Vliesstoff (Polyfelt TS 800) und ein Gewebe (Stabilenka 400) ausgewählt. In den Bildern 88 und 89 ist die Oberfläche der verwendeten Geotextilien abgebildet.

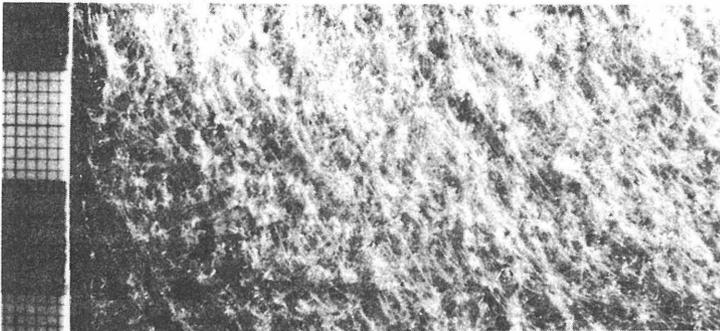


Bild 88: Geotextil G1 : Verfestigter Vliesstoff

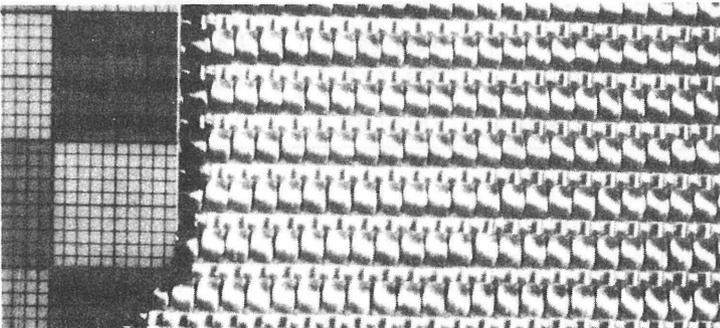


Bild 89: Geotextil G2: Gewebe

3.8.1.2 Verwendete Böden

Als Bodenmaterial wurden zwei Sande, ein Grobsand Boden B1 und ein Mittelsand Boden B2 verwendet. Bild 90 zeigt die Kornverteilungslinien der verwendeten Böden, die bodenmechanischen Kennwerte der Böden sind in Bild 91 zusammengestellt.

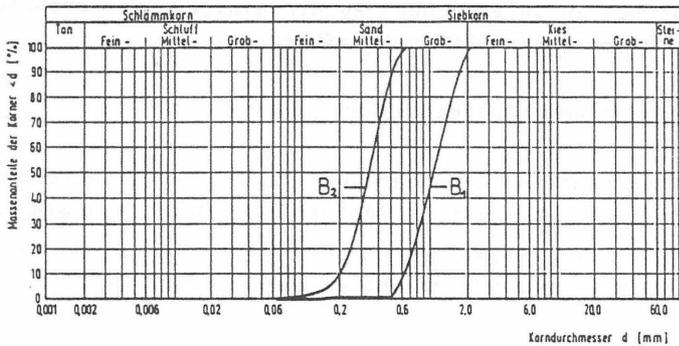


Bild 90: Kornverteilungslinien der verwendeten Sande

	Grobsand B1	Mittelsand B2
Bodenart (DIN 4022)	gS,ms'	mS,fs'
Bodenart (DIN 18196)	SE	SE
Ungleichförmigkeit [-]	1,910	1,8660
Krümmung [-]	0,7071	0,7406
Korndichte [t/m^3]	2,65	2,65
Kornrauigkeit [-]	kantig	gerundet
e_{min}/e_{max} [-]	0,61 / 0,84	0,51 / 0,77
n_{min}/n_{max} [-]	0,38 / 0,46	0,34 / 0,43
ρ_{Dmin}/ρ_{Dmax} [t/m^3]	1,44 / 1,65	1,50 / 1,76

Bild 91: Bodenmechanische Kennwerte der verwendeten Sande

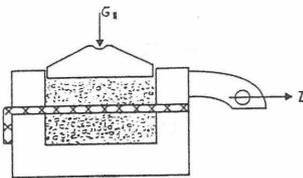
3.8.1.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden im Schergerät 10 cm * 10 cm durchgeführt. Die Normalspannungen G_N der einzelnen Teilversuche betragen 50, 100 und 150 kN/m². Die Abschergeschwindigkeit wurde mit $v = 1,0$ mm/min gewählt. Der Boden wurde jeweils mit dichter Lagerung eingebaut.

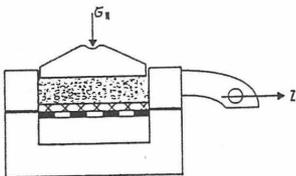
Insgesamt wurden folgende Versuchsvarianten untersucht:

Variante 1 : Boden / Boden	B / B
Variante 2 : Boden, Geotextil / Boden	B,G / B
Variante 3 : Boden, Geotextil / Geotextil, Boden	B,G / G,B
Variante 4 : Dichtungsbahn / Geotextil, Boden	DB / G,B
Variante 5 : Starrer Untergrund, Geotextil / Boden	G / B

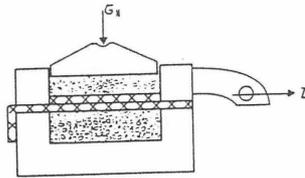
Die Lage der Scherfuge ist jeweils durch einen ' / ' gekennzeichnet. Bild 92 stellt die Versuchsvarianten 2 bis 4 schematisch dar. Die Zeichnungen sind aus Gründen der Anschaulichkeit nicht maßstabsgerecht.



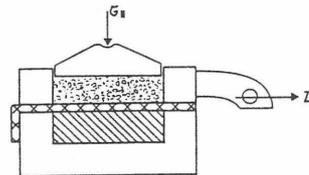
Variante 2:
Boden / Geotextil, Boden



Variante 4:
Dichtungsbahn / Geot., Boden



Variante 3:
Boden, Geot./ Geot., Boden



Variante 5:
Geotextil / Boden

Bild 92: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten

3.8.2 Versuchsergebnisse

In den Bildern 93 und 94 sind die Scherfestigkeits-/ Normalspannungsdiagramme der mit dem Grobsand B1 und den beiden Geotextilien durchgeführten Scherversuche dargestellt.

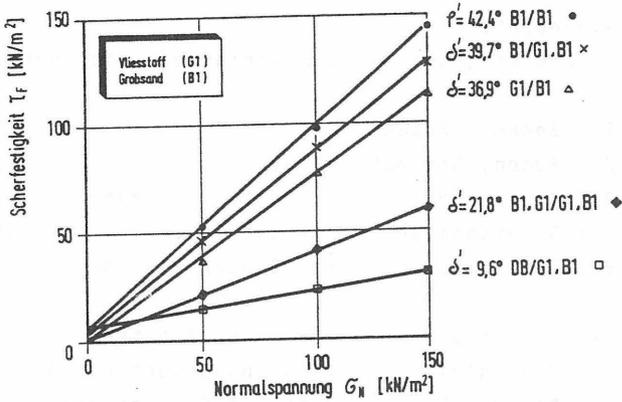


Bild 93: Scherfestigkeits -/ Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Grobsand B1 und Vliesstoff G1

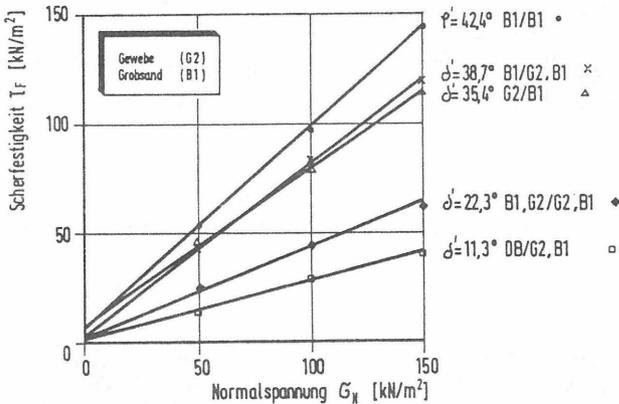


Bild 94: Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Grobsand B1 und Gewebe G2

In den Bildern 95 und 96 sind die Scherfestigkeits-/ Normalspannungsdiagramme der Versuche mit dem Mittelsand B2 und den verwendeten Geotextilien aufgetragen.

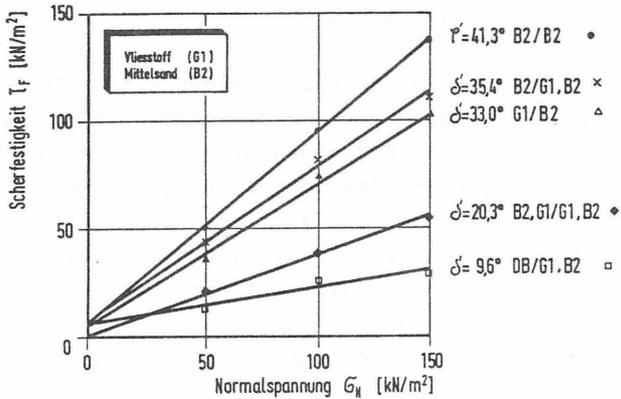


Bild 95: Scherfestigkeits-/ Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Mittelsand B2 und Vliesstoff G1

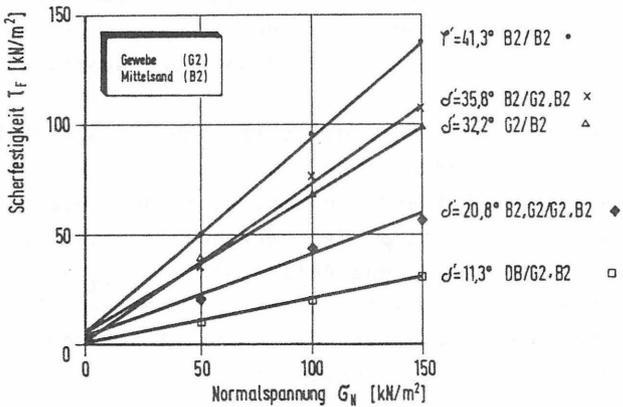


Bild 96: Scherfestigkeits-/ Normalspannungsdiagramm der Versuche mit Mittelsand B2 und Gewebe G2

Wie aus den Diagrammen zu ersehen ist, traten bei einigen Versuchen geringe Kohäsions- bzw. Adhäsionsanteile auf. Da es sich um nichtbindige Böden und nicht adhäsive Materialien handelt, müssen diese Anteile aus versuchsbedingten Einflüssen resultieren. Sie werden daher bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß zwischen den Geotextilien und der glatten Dichtungsbahn die geringsten Reibungskräfte übertragbar sind. Zwischen Boden und Geotextil werden, je nach Untergrundbedingungen unterschiedlich große Reibungskräfte übertragen. Liegt das Geotextil auf einem starren, glatten Untergrund (Variante 5), kann eine Verzahnung des Geotextils mit dem Untergrund nicht stattfinden, es ergeben sich wesentlich geringere übertragbare Scherkräfte als bei der Versuchsvariante 2, bei der während des Versuches eine Verzahnung des Geotextils mit dem ober- und unterhalb befindlichen Boden stattfinden kann. Aus dieser Verzahnung ergeben sich deutlich größere übertragbare Scherkräfte zwischen dem Geotextil und dem Boden. Für den Fall sich überlappender Geotextilien wurden ebenfalls Scherversuche durchgeführt (Versuchsvariante 3), wobei die Geotextilien beidseitig Bodenkontakt aufwiesen. Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß die übertragbaren Scherkräfte zwischen den Geotextilien aufgrund der Verzahnung mit dem umgebenden Boden größer sind, als die Scherkräfte zwischen Dichtungsbahn und Geotextil.

Um einen bewertenden Vergleich der übertragbaren Scherkräfte vornehmen zu können, wurden die ermittelten Reibungsbeiwerte $\tan \delta'$ zwischen Geotextil und dem entsprechendem Reibpartner auf den Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des verwendeten Bodens bezogen. Daraus ergibt sich der bezogene Reibungsbeiwert $\mu_v = \tan \delta' / \tan \varphi'$. Dieser Reibungsbeiwert gibt an, welcher Anteil der Scherkräfte des Bodens zwischen dem Geotextil und dem verwendeten Reibpartner übertragen werden können.

In Bild 97 sind die bezogenen Reibungsbeiwerte für alle Versuche zusammengestellt. Bild 98 zeigt eine graphische Darstellung der ermittelten, bezogenen Reibungsbeiwerte.

Zusammenstellung der bezogenen Reibungsbeiwerte μ_v [-]						
Variante		1	2	3	4	5
Geotextil	Boden	B/B	B/G/B	B/G/G/B	DB/G/B	G/B
G1	B1	1	0,92	0,44	0,19	0,83
	B2	1	0,81	0,46	0,19	0,74
G2	B1	1	0,89	0,45	0,23	0,79
	B2	1	0,82	0,43	0,23	0,71

Bild 97: Zusammenstellung der bezogenen Reibungsbeiwerte

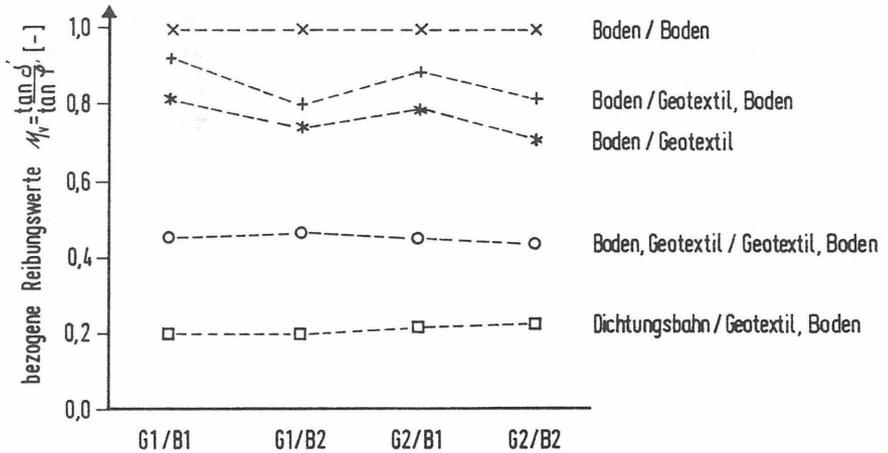


Bild 98: Graphische Darstellung der bezogenen Reibungsbeiwerte

Es wurden Scherversuche im 10 cm * 10 cm Schergerät mit verschiedenen Geotextilien, Sanden und HDPE Kunststoffdichtungsbahnen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß zwischen Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen die geringsten Scherkräfte übertragen werden. Es wurden Reibungswinkel zwischen 9° und 12° erreicht. Die Ergebnisse stimmen gut mit den bereits in Kapitel 2.4, S. 44, erwähnten Angaben von WILLIAMS (1986, [35]) überein. Zwischen Geotextilien und Boden wurden in Abhängigkeit von den Untergrundbedingungen und den verwendeten Böden unterschiedliche Scherfestigkeiten ermittelt. Liegt das Geotextil auf einem festen, glatten Untergrund werden um 10 % geringere Reibungsbeiwerte ermittelt als bei Versuchen mit beidseitigem Bodenkontakt. Auf festem, glatten Untergrund betragen die bezogenen Reibungsbeiwerte zwischen $\mu_v = 0,71$ und 0,83. Bei Versuchen mit beidseitigem Bodenkontakt lagen die bezogenen Reibungsbeiwerte zwischen 0,81 und 0,92. Das bedeutet, daß je nach Boden und Geotextilbeschaffenheit 81 bis 92 % der Scherfestigkeit des Bodens zwischen dem Geotextil und dem Boden erreicht werden. Bei glatter, fester Unterlage, z.B. Geotextilien als Schutzschicht auf einer Kombinationsabdichtung, werden zwischen Geotextil und Boden nur 70 bis 80 % der Scherfestigkeit des Bodens erreicht, weil in diesem Fall eine Verzahnung mit dem Untergrund nicht oder nur in geringerem Maße stattfindet.

Bei der Ermittlung des Reibungsverhaltens zwischen den einzelnen Geotextilien, z.B. in Überlappungsbereichen, wurden ca. 45 % der Scherfestigkeit des umgebenden Bodens erreicht.

4 BEWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE UND EMPFEHLUNGEN

4.1 Vorbemerkung

Für einige ausgewählte Kunststoffdichtungsbahnen mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur und verschiedenen nichtbindigen und bindigen Böden wurde das Reibungsverhalten zwischen Böden und Dichtungsbahnen und der Böden selbst untersucht, so daß aus den vorliegenden Versuchsergebnissen Empfehlungen für die versuchstechnische Ermittlung der Scherfestigkeit zwischen Böden und Kunststoffdichtungsbahnen sowie über die Größe der übertragbaren Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahnen und Böden abgeleitet werden können. Außerdem wird aufgezeigt, welche Auswirkungen sich für die Standsicherheit von geeigneten Kombinationsdichtungen in den verschiedenen Bau- und Betriebsphasen einer Deponie ergeben.

4.2 Empfehlungen für die versuchstechnische Ermittlung von Scherparametern

Zur Ermittlung der Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahnen und Böden sind Scherversuche in Kastenschervergeräten durchzuführen. Herausziehversuche sind weniger gut geeignet, da bei diesen Versuchen Zugspannungen in die Dichtungsbahn eingeleitet werden, die zu Verformungen der Dichtungsbahn führen. Je nach Größtkorn des zu untersuchenden Bodens sind die Versuche im Schergerät 10 cm * 10 cm oder 30 cm * 30 cm auszuführen.

4.2.1 Versuche mit nichtbindigen Böden

Folgende Punkte sind bei der Durchführung von Scherversuchen mit nichtbindigen Böden zu beachten:

- Die Versuche können im erdfeuchten oder trockenen Zustand durchgeführt werden. Der Wassergehalt des Bodens hat auf die Scherfestigkeit des Bodens sowie auf die Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn keinen nennenswerten Einfluß.
- Für die Versuche ist der Auflastbereich festzulegen.

- Für Oberflächenabdichtungen und Basisabdichtungen im Bauzustand sind geringe Auflasten bis 25 kN/m^2 zu untersuchen.
- Für den Endzustand von Basisabdichtungen sollten Auflasten zwischen 100 und 300 kN/m^2 oder höher gewählt werden.
- Die Schergeschwindigkeit soll mit $1,0 \text{ mm/min}$ gewählt werden.
- Die Versuche sollten bei möglichst dichter Lagerung des Bodens durchgeführt werden.

4.2.2 Versuche mit nichtbindigen Böden

Bei der Durchführung von Scherversuchen zwischen Dichtungsbahnen und mineralischen Abdichtungsmaterialien ist es erforderlich, den Einfluß des Wassergehaltes auf die Scherfestigkeit zu berücksichtigen.

- Die zu untersuchenden Wassergehalte sollten den anhand der Proctorkurve in der Eignungsprüfung festgelegten Einbauwassergehalten entsprechen.
- Die Einbaudichte sollte der zugehörigen Proctordichte entsprechen.
- Die Konsolidierungszeit sollte mindestens 24 Stunden betragen.
- Die Versuchsgeschwindigkeit ist möglichst klein zu wählen, um das Auftreten von Porenwasserdrücken zu vermeiden.
- Die Auflasten sollten dem Verwendungszweck entsprechend gewählt werden.

Die in Scherversuchen ermittelten Scherparameter sind entsprechend den EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSAUSSCHUSSES FÜR UFER-EINFASSUNGEN EAU 1985, [41] auf Rechenwerte abzumindern. Folgende Abminderungen sind demnach vorzunehmen:

$$\text{cal } \tan \varphi' = \tan \varphi' / 1.1 \quad \text{cal } c' = c' / 1.3$$

Diese Abminderungen berücksichtigen Versuchsungenauigkeiten und Versuchseinflüsse sowie den Einfluß von Inhomogenitäten innerhalb der verwendeten Bodenmaterialien auf die Ermittlung von Scherparametern im Scherversuch.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige speziell ausgewählte Böden und ihr Reibungsverhalten gegenüber Dichtungsbahnen untersucht. Die für diese Böden ermittelten Scherparameter können jedoch nicht allgemeingültig für andere Böden und Boden-gemische übernommen werden. Liegen Versuchsergebnisse aus Scherversuchen nicht vor, sind für Vorentwürfe nach der EAU 1985, [41] folgende Parameter anzunehmen.

	cal γ	cal γ'	cal φ'	cal c'	cal c_u	cal E_s
	kN/m ³	kN/m ³	in°	kN/m ²	kN/m ²	MN/m ²
Nichtbindige Böden						
Sand, locker, rund	18	10	30	–	–	20– 50
Sand, locker, eckig	18	10	32,5	–	–	40– 80
Sand, mitteldicht, rund	19	11	32,5	–	–	50–100
Sand, mitteldicht, eckig	19	11	35	–	–	80–150
Kies ohne Sand	16	10	37,5	–	–	100–200
Naturschotter,						
scharfkantig	18	11	40	–	–	150–300
Sand, dicht, eckig	19	11	37,5	–	–	150–250
Bindige Böden						
(Erfahrungswerte aus dem norddeutschen Raum für ungestörte Proben)						
Ton, halbfest	19	9	25	25	50–100	5 – 10
Ton, schwer knetbar, steif	18	8	20	20	25– 50	2,5– 5
Ton, leicht knetbar, weich	17	7	17,5	10	10– 25	1 – 2,5
Geschiebemergel, fest	22	12	30	25	200–700	30 – 100
Lehm, halbfest	21	11	27,5	10	50–100	5 – 20
Lehm, weich	19	9	27,5	–	10– 25	4 – 8
Schluff	18	8	27,5	–	10– 50	3 – 10

Bild 99: Scherparameter für Vorentwürfe nach EAU 1985, [41]

4.3 Übertragbare Scherfestigkeiten zwischen Dichtungsbahnen und Böden

Um allgemeingültige Aussagen zum Reibungsverhalten zwischen Dichtungsbahnen und Böden treffen zu können, wurden bezogene Reibungswerte eingeführt. Diese Reibungsbeiwerte geben das Verhältnis der erreichten Scherfestigkeit zwischen Boden und Dichtungsbahn zur Scherfestigkeit des Bodens an. Sie sind damit unabhängig von den absolut erreichten Scherfestigkeiten.

4.3.1 Empfehlungen für Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahnen und nichtbindigen Böden

Für nichtbindige Böden und verschieden strukturierte Dichtungsbahnen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Mit zunehmendem Korndurchmesser nimmt die Scherfestigkeit zwischen wenig profilierten und glatten Dichtungsbahnen und nichtbindigen Böden ab.
- Für glatte und wenig profilierte Dichtungsbahnen beträgt die übertragbare Scherfestigkeit bei grobkörnigen Böden maximal 50 bis 60 Prozent der Scherfestigkeit des Bodens.
- Durch stärkere Oberflächenprofilierung kann die Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden erhöht werden. Bei Profilhöhen zwischen 0,5 und 1,0 mm werden 60 bis 75 %, bei Profilhöhen von 1,0 bis 2,0 mm werden 75 bis 95 % der Scherfestigkeit des Bodens erreicht.
- Mit abnehmender Lagerungsdichte verringert sich der Reibungswinkel des Bodens, entsprechend verringert sich der Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden. Der bezogene Reibungsbeiwert wird davon nicht berührt.

In Bild 100 sind für verschiedene Dichtungsbahnen und nichtbindige Böden Empfehlungen für den Ansatz von Reibungswinkeln zwischen Dichtungsbahnen und Böden angegeben. Diese Angaben dienen als erster Anhalt für Vorplanungen und Entwürfe. Sie können jedoch projektbezogene Scherversuche nicht ersetzen.

Empfehlungen für Reibungswinkel δ' zwischen nichtbindigen Böden und Kunststoffdichtungsbahnen			
Dichtungsbahn	Boden		
	Sand		Kies
Profilhöhen	Ungleichförmigkeit U		
	U < 3	U > 3	
glatt	0,50 ρ'	0,60 ρ'	0,50 ρ'
0,5 - 1,0mm	0,60 ρ'	0,75 ρ'	0,70 ρ'
1,0 - 2,0mm	0,85 ρ'	0,95 ρ'	0,90 ρ'

Bild 100: Empfehlungen für Reibungswinkel zwischen nichtbindigen Böden und Dichtungsbahnen

4.3.2 Empfehlungen für Reibungswinkel und Adhäsion zwischen Dichtungsbahnen und bindigen Böden

Den entscheidenden Einfluß auf die Scherparameter zwischen bindigen Böden und Dichtungsbahnen übt der Wassergehalt der bindigen Böden aus. Der Einbau des mineralischen Abdichtungsmaterials sollte auf der Baustelle jeweils im Bereich der nach der Eignungsprüfung festgelegten Einbauwassergehalte zwischen dem optimalen Proctorwassergehalt und dem Wassergehalt bei einem Verdichtungsgrad von 95 % auf der nassen Seite der Proctorkurve erfolgen, um eine homogene und nahezu undurchlässige Dichtungsschicht zu erhalten. Je nach Tonanteil der bindigen Böden, reagieren diese unterschiedlich auf Änderungen des Wassergehaltes.

Aus den Versuchsergebnissen, die mit verschiedenen Dichtungsbahnen und Böden bei nahezu optimalem Einbauwassergehalt durchgeführt wurden, ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Bei optimalen Einbauwassergehalten nimmt die Scherfestigkeit zwischen den Dichtungsbahnen und dem Boden je nach Oberflächenstrukturierung ab.
- Die erreichbare Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden hat besonders im Bereich kleiner Auflasten – also während der Bauphase und bei Oberflächenabdeckungen – einen entscheidenden Anteil an der insgesamt erreichbaren Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden.
- Für den Bereich kleiner Auflasten 25 kN/m^2 betragen die erreichbaren Scherfestigkeiten zwischen Boden und verschiedenen Dichtungsbahnen:

bei Schluff 50 bis 77 % der Scherfestigkeit des Schluffs.

bei Ton 25 bis 67 % der Scherfestigkeit des Tons.

Für den Bereich hoher Auflasten nimmt der Einfluß der Adhäsion an der Gesamtscherfestigkeit ab. Für Auflasten von 200 kN/m^2 wurden folgende Werte ermittelt:

bei Schluff 60 bis 83 % der Scherfestigkeit des Schluffs.
 bei Ton 58 bis 74 % der Scherfestigkeit des Tons.

Bei steigendem Wassergehalt des Bodens verändert sich seine Konsistenz, die Kohäsion des Bodens und damit auch die Adhäsion zwischen der Dichtungsbahn und dem Boden wird verringert.

Bei Schluff verringerte sich mit steigendem Wassergehalt der Reibungswinkel zwischen einer glatten Dichtungsbahn und dem Boden auf ca. $2/3$ des Reibungswinkels des Bodens. Die Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden geht nahezu vollständig verloren.

Bei Ton nimmt der Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden leicht ab, entspricht aber im wesentlichen dem Reibungswinkel des Bodens.

Die Kohäsion des Bodens nimmt mit steigendem Wassergehalt auf ca. 50 % der Kohäsion bei optimalem Wassergehalt ab. Die Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden verringert sich auf ca. 30 % der Kohäsion des Bodens bei optimalem Wassergehalt.

Durch den Einfluß des Wassergehaltes wird bei bindigen Böden, besonders die Adhäsion zwischen Dichtungsbahnen und Böden stark verringert, und damit die übertragbare Scherfestigkeit im Bereich kleiner Auflasten herabgesetzt.

Kurzfristige hohe Belastungen setzen die Scherfestigkeit gerade bei Tonen stark herab. Der Reibungswinkel geht gegen Null, die Adhäsion zwischen glatten Dichtungsbahnen und Boden geht nahezu verloren. Bei genoppten Dichtungsbahnen entspricht die übertragbare Scherfestigkeit der Scherfestigkeit des Bodens.

In Bild 101 sind Empfehlungen für den Ansatz von Reibungswinkel δ' und Adhäsion a' zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und bindigen Böden in Abhängigkeit von verschiedenen Proctorwassergehalten angegeben. Da besonders bei bindigen Böden das Scherverhalten vom Wassergehalt und der Konsistenz abhängig ist, sind diese Empfehlungen nur als erster Anhalt für Vorwürfe und Planungen zu verstehen. Grundsätzlich wird empfohlen, strukturierte Dichtungsbahnen mit größeren, einzelnen Profilstrukturen zu verwenden, um eine gewisse Verzahnung zu erzielen. Durch die Verzahnung können geringe Schmierfilme aus Kondenswasserbildung an der Oberfläche der mineralischen Dichtung überbrückt werden, ohne eine erhebliche Einbuße an übertragbaren Scherkräften zu erleiden, wie dies bei glatten Kunststoffdichtungsbahnen der Fall ist. Die nachfolgend aufgeführten Werte gelten daher nur für Dichtungsbahnen, die eine Verzahnung mit dem Dichtungsmaterial erwarten lassen. In allen anderen Fällen ist auf den Ansatz der Adhäsion zu verzichten.

Empfehlungen für Reibungswinkel δ' und Adhäsion zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und bindigen Böden für verschiedene Proctorwassergehalte				
Wassergehalt	Ton		Schluff	
	δ' [°]	a' [kN/m ²]	δ' [°]	a' [kN/m ²]
W_{opt}	0,9 ρ'	0,3 c'	0,65 ρ'	0,15 c'
W_{97}	0,8 ρ'	0,2 c'	0,65 ρ'	0
W_{95}	0,7 ρ'	0,2 c'	0,65 ρ'	0
mit ρ' und c' bei optimalem Wassergehalt				

Bild 101: Empfehlungen für Reibungswinkel und Adhäsion
zwischen bindigen Böden und Dichtungsbahnen

4.4 Auswirkungen auf die Standsicherheit von Kombinationsdichtungssystemen

4.4.1 Allgemeines

Bei der Planung von Deponien wird angestrebt, den zur Verfügung stehenden Deponiestandort bestmöglichst zu nutzen und ein Maximum an verfügbarem Volumen für den einzulagernden Abfall zu erhalten. Die Neigung der anzulegenden Böschungen ist hierbei von Bedeutung. Je steiler die Böschungen und die darauf auszuführende Kombinationsdichtung ausgebildet werden können, desto größer wird das nutzbare Deponievolumen. Bild 102 zeigt die Veränderung des Deponiequerschnittes einer Grubendeponie bei verschiedenen Böschungsneigungen.

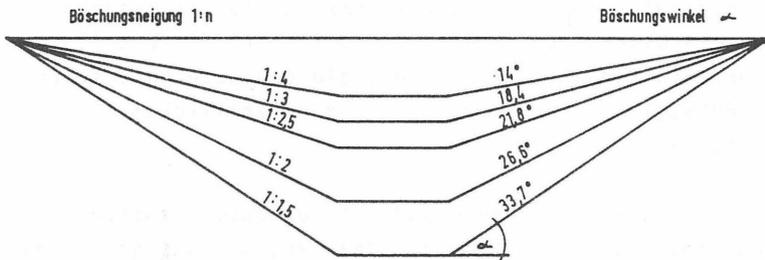


Bild 102: Veränderung des Deponiequerschnittes einer Grubendeponie bei verschiedenen Böschungsneigungen

Bei der Ausbildung der Böschungen sind jedoch Fragen der Standsicherheit, Wirtschaftlichkeit der Ausführung, Belange der Sickerwasserfassung und Ableitung sowie Aspekte der Dauerhaftigkeit des gesamten Dichtungssystems zu berücksichtigen.

Nachfolgend werden daher an Hand eines Beispiels die Auswirkungen der aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse für die Planung und Ausführung von dauerhaften Kombinationsabdichtungssystem auf Böschungen erläutert.

4.4.2 Auswirkungen auf die Bauphase von geneigten Basisabdichtungen

Im Hinblick auf die kommende TA - Abfall (Technische Anleitung zur Beseitigung und Vermeidung von Abfällen) werden für die nachfolgenden Überlegungen folgende Annahmen getroffen. Entsprechend den in der TA - Abfall vorgegebenen Anforderungen für die mineralische Dichtung wird als Abdichtungsmaterial ein plastischer Ton mit einem Tongehalt von mindestens 20 M.% verwendet. Nach den Angaben der EAU 1985, [42] wird einen Reibungswinkel von $\varphi' = 20^\circ$ und eine Kohäsion von $c' = 30 \text{ kN/m}^2$ angenommen. Die Böschungslänge der auszuführenden Kombinationsdichtung betrage $L = 50 \text{ m}$, die Stärke der Flächendränage aus Kies mit einer Körnung von 4 - 32 mm Rundkorn sei $D = 1,0 \text{ m}$, die Wichte der Dränage $\gamma = 1,7 \text{ t/m}^3$ und der Reibungswinkel $\varphi' = 44^\circ$. Als Kunststoffdichtungsbahn wird eine HDPE - Dichtungsbahn mit genoppter Unterseite und glatter Oberfläche gewählt. Dabei soll die genoppte Unterseite eine größtmögliche Verzahnung mit dem mineralischem Abdichtungsmaterial bewirken.

Um eine dauerhafte, zugfreie und auf der Böschung standsichere Kombinationsdichtung zu erhalten, muß die größtmögliche Böschungsneigung entsprechend einer Standsicherheitsbetrachtung ermittelt werden. Nach DIN 4084 ist eine Böschung mit ebenen Gleitflächen standsicher, wenn der Reibungswinkel dem Böschungswinkel entspricht. Zugkräfte in der Dichtungsbahn werden vermieden, wenn die Scherkräfte zwischen der Dichtungsbahn und dem Untergrund größer sind als die Kräfte, die vom Dränagematerial in die Dichtungsbahn übertragen werden.

Durch die Versuche konnte belegt werden, daß der Reibungswinkel zwischen einer glatten Dichtungsbahn und nichtbindigen Materialien ca. 50 % des Reibungswinkels des Bodens beträgt. Danach ergibt sich zwischen Dichtungsbahn und Dränagematerial ein Reibungswinkel von 22 Grad.

Für das bindige Abdichtungsmaterial ist der Einbau und die Verdichtung des Materials bei einem Einbauwassergehalt zwischen dem optimalen und dem Wassergehalt bei 95 % Proctordichte auf der nassen Seite der Proctorkurve erforderlich, um eine möglichst homogene, plastische und undurchlässige mineralische Dichtungsschicht zu erhalten. Zwischen dem Abdichtungsmaterial und der Dichtungsbahn betrage in diesem Fall die Adhäsion $a' = 10 \text{ kN/m}^2$ der Reibungswinkel $\delta' = 17^\circ$.

Die jeweils übertragbare Scherfestigkeit ergibt sich nach folgender Formel zu:

$$\tau_F = \sigma_N * \tan \delta' + a'$$

Die Normalspannung σ_N resultiert aus dem Gewicht des Dränagematerials und ergibt aus Vertikalspannung σ_G zu:

$$\sigma_N = \sigma_G * \cos \alpha.$$

Sie wird in diesem Fall kleiner als 15 kN/m^2 sein. Werden die übertragbaren Scherfestigkeiten in einem Scherfestigkeits-/Normalspannungsdiagramm dargestellt (siehe Bild 104), wird deutlich, daß im Bereich kleiner Auflasten die übertragbaren Scherspannungen zwischen der Dichtungsbahn und dem mineralischem Dichtungsmaterial größer sind als die vom Dränagematerial in die Dichtungsbahn eingeleiteten Scherspannungen. Die auf der Böschung entstehenden Scherspannungen werden daher zugspannungsfrei in den Untergrund abgetragen. Der Böschungswinkel kann mit $\alpha = 22$ Grad ausgeführt werden, ohne daß das Dränagematerial von der Böschung abrutscht, da die entstehenden Scherspannungen in die Dichtungsbahn eingeleitet werden und von dieser in den Untergrund übertragen werden. Bild 104 zeigt das Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm für diesen Fall.

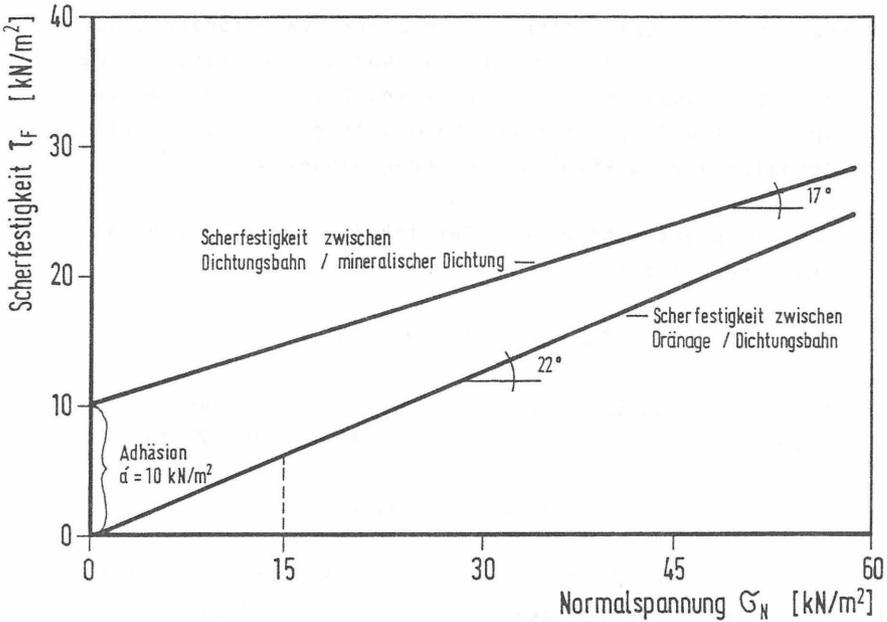


Bild 104: Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramm für die übertragbaren Scherspannungen oberhalb und unterhalb der Dichtungsbahn

Diese Betrachtungsweise setzt allerdings voraus, daß die Oberfläche der mineralischen Dichtungsschicht, auf der die Dichtungsbahn verlegt werden soll, tatsächlich die angenommenen Scherparameter aufweist, und diese nicht durch z.B. Witterungseinflüsse oder Baubetrieb reduziert werden.

4.4.2.2 Witterungsbedingte Einflüsse und deren Auswirkungen

Aus baubetrieblichen Gründen werden im allgemeinen zunächst größere Bereiche der mineralischen Dichtung lagenweise eingebaut und verdichtet. Anschließend müssen noch die Ergebnisse der Qualitätsprüfung durch Eigen-, Fremd- und behördlicher Überwachung abgewartet werden und die Abnahme durch die Behörde erfolgt sein, um mit der Verlegung der Dichtungsbahnen beginnen zu können.

Diese Maßnahmen erfordern im allgemeinen einen Zeitraum von mehreren Tagen oder sogar Wochen. Werden in Teilbereichen der fertiggestellten Dichtungsschicht Nachbesserungen und damit verbundene Nachprüfungen erforderlich, sind die ausgeführten Bereiche gegebenenfalls mehrere Wochen der Witterung ausgesetzt. Dadurch ergeben sich zwangsläufig Veränderungen an der Oberfläche der fertiggestellten Dichtungsschicht. Bild 105 zeigt eine Übersicht der bei der Herstellung von Kombinationsdichtungen zu beachtenden Einflüsse und Auswirkungen.

Im Sommer kann es zu starken Austrocknungen und damit zu einem Schrumpfen des Materials kommen. Die Konsistenz der bindigen Dichtungsschicht verändert sich, sie wird zunehmend fest, hart und spröde. Es zeigen sich deutlich Schrumpfrisse in der Dichtungsschicht. Ein Verlegen der Dichtungsbahn auf einer solchen Dichtungsschicht ist aus zwei Gründen zu unterlassen. Erstens kann eine vollflächige Verzahnung zwischen der Dichtungsbahn und dem Dichtungsmaterial nicht gewährleistet werden, dadurch geht die Adhäsion zwischen der Dichtungsbahn und dem Dichtungsmaterial partiell verloren, die übertragbaren Scherspannungen nehmen ab und es entstehen Zugspannungen in der Dichtungsbahn, sobald das Dränagematerial auf die Dichtungsbahn aufgebracht wird. Zweitens ist durch die Dichtungsbahn ein Wasserzutritt zu dem Dichtungsmaterial verhindert. Das Dichtungsmaterial bleibt daher trocken und spröde, die Schrumpfrisse können sich durch das mit einer Wassergehaltszunahme verbundene Quellen des Dichtungsmaterials nicht mehr schließen. Somit ist eine erhebliche Qualitätseinbuße hinsichtlich der Durchlässigkeit des Dichtungsmaterials gegeben.

WITTERUNGSEINFLÜSSE UND DEREN AUSWIRKUNGEN BEI DER HERSTELLUNG VON KOMBINATIONSDICHTUNGEN

MINERALISCHE DICHTUNG



KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHN

Wirkung	Maßnahme	Auswirkung	Äußere Einflüsse	Auswirkung	Maßnahme	Wirkung
optimale Oberfläche nach dem abtragen der Schutzschicht und erneuter Verdichtung	zusätzliche Schutzschicht aus mineralischer Dichtung	Austrocknung, Versprödung, Risse, harte, feste Oberfläche Verlust der Adhäsion, keine Verzahnung mit der Dichtungsbahn Qualitätseinbuße	◁ SONNE TEMPERATUR ▷	Temperaturdehnung, Aufwölbung, Wellenbildung, Abheben vom Untergrund, Verlust der Adhäsion und Reibung -> Zugspannung aus Eigengewicht auf Böschungen, bleibende Aufwölbung am Böschungsfuß	Möglichst schnell Drainage und Schutzschicht aufbringen	Verminderung des Temperatureinflusses Belastung gewährleistet Adhäsion und Verzahnung, keine Zugspannung, keine Aufwölbungen
siehe oben nur bei sorgfältiger Verlegung erfolgversprechend	mineralischer Dichtung Baufolie	Durchnässung, verminderte Adhäsion, Schmierfilm, Erosion	◁ REGEN ▷	Verschweißbarkeit eingeschränkt, Verlust der Adhäsion, -> Zugspannung Verschmutzung, Schweißnahtqualität wird vermindert	möglichst nicht verlegen	
Frostschutzwirkung	Drainage und Schutzschicht direkt nach DB - Verlegung aufbringen	Auffrieren, Qualitätsminderung	◁ FROST ▷	Verschweißbarkeit eingeschränkt	möglichst nicht Schweißen	
siehe oben	Schutz aus mineralischer Dichtung	Austrocknung, Risse	◁ WIND ▷	Abheben durch Windsog	Drainage und Schutzschicht aufbringen	kein Abheben
nach Herstellung einer optimalen Oberfläche sofort in kleinen Abschnitten die Dichtungsbahn (DB) verlegen			◁ GENERELL ▷	nach Herstellung einer optimalen Oberfläche der mineralischen Dichtung sofort in Abschnitten verlegen		

Bild 105: Witterungseinflüsse und deren Auswirkung

Bei heftigen Regenfällen weicht die Oberfläche der Dichtung durch den Wasserzutritt auf, die Konsistenz wird weich bis breiig. Dadurch wird ebenfalls die Adhäsion zwischen der Dichtungsbahn und der mineralischen Dichtung herabgesetzt und somit verringert sich auch die übertragbare Scherfestigkeit zwischen der Dichtungsbahn und dem Boden.

Außerdem ist mit einer starken Verschmutzung der Dichtungsbahn beim Verlegen und Verschweißen der Dichtungsbahn zu rechnen. Die Verschweißung der Dichtungsbahnen ist jedoch ausschließlich an trockenen und sauberen Dichtungsbahnen zulässig, da sonst erheblich Einbußen der Schweißnahtqualität zu befürchten sind.

Zur Herstellung und Ausführung einer standsicheren und dauerhaften Kombinationsabdichtung auf Böschungen ist es daher erforderlich, daß die Oberfläche des Dichtungsmaterials zum Zeitpunkt der Verlegung der Dichtungsbahnen eine den Einbaubedingungen entsprechende Konsistenz und den damit verbundenen Wassergehalt und die zugehörige Dichte aufweist. Die fertiggestellte mineralische Dichtungsschicht ist deshalb durch geeignete Maßnahmen vor Witterungseinflüssen zu schützen. Eine bisher häufige Schutzmaßnahme war das Abdecken der fertiggestellten Bereiche mit Baufolien. Diese Maßnahme verspricht aber nur Erfolg, wenn die Verlegung äußerst sorgfältig erfolgt. Die Folien müssen vollflächig auf dem Dichtungsmaterial aufliegen und dürfen nicht durch Windsog abgehoben werden, da sonst besonders im Sommer das unter den Folien sich niederschlagende Kondenswasser sehr schnell verdunstet und vom unter die Folie greifenden Wind abtransportiert wird. Der Austrocknungseffekt kann dadurch gegebenenfalls noch verstärkt werden.

Außerdem ist sicherzustellen, daß die Folien in Gefällerrichtung von unten nach oben mit ausreichender Überlappung verlegt werden, da sonst ein Schutz vor Wasserzutritt nicht gegeben ist.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Herstellung einer zusätzlichen, 10 bis 15 cm starken Lage aus Dichtungsmaterial als vorübergehende Schutzschicht, die kurz vor dem Verlegen

der Dichtungsbahn wieder abgetragen wird. Dieses Material steht danach wieder für den Einbau in einem anderen Abschnitt zur Verfügung. Durch ein erneutes Abwalzen kann erreicht werden, daß die darunter befindliche Dichtungsschicht in optimaler Weise für die Verlegung der Dichtungsbahnen vorbereitet ist.

Diese Arbeitsweise erfordert jedoch einen hohen Arbeitsaufwand und eine entsprechende Koordination zwischen ausführender Baufirma und dem Verleger der Dichtungsbahnen, da zeitliche Verzögerungen ein erneutes Offenliegen der Dichtungsschicht bedingen und gegebenenfalls mit Qualitätseinbußen zu rechnen ist.

Verschiedene Bauweisen

Neue Überlegungen gehen davon aus, daß die Dichtungsbahnen an der Basis der Deponien mit einer Schutzschicht zu versehen sind, um ein Durchstanzen des grobkörnigen Dränagematerials durch die Dichtungsbahn, infolge der mit der Verfüllung zunehmenden Auflasten, zu verhindern. Üblicherweise werden Geotextilien auf der Dichtungsbahn verlegt, um diese Schutzfunktion zu übernehmen. Untersuchungen zwischen glatten Dichtungsbahnen und verschiedenen Geotextilien haben ergeben, daß der Reibungswinkel zwischen der Dichtungsbahn und dem Geotextil zwischen 6 und 12 Grad liegt. Daher können zwischen Dichtungsbahn und dem Geotextil nur geringe Scherspannungen übertragen werden. Die Böschungsneigung müßte entsprechend auf Neigungen zwischen 6 und 12 Grad ausgelegt werden, da sonst bei längeren Böschungen Zugspannungen vom Dränagematerial in das Geotextil eingeleitet werden. Durch die Ausbildung derart flacher Böschungen wird jedoch das nutzbare Deponievolumen erheblich verringert. Um trotzdem größere Böschungsneigungen ausführen zu können, muß auf die bisher übliche Bauweise (siehe Bild 106 a):

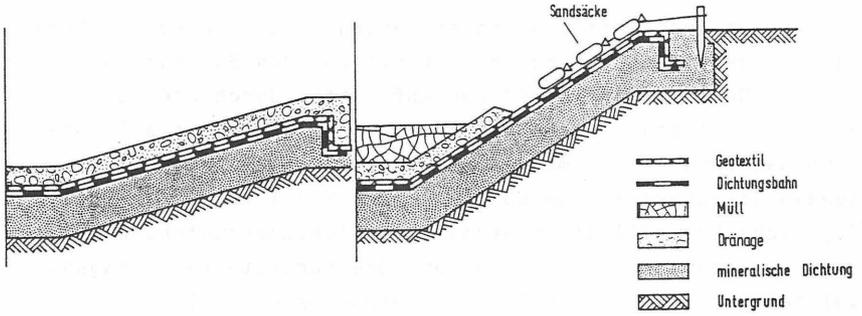
- Aufbringen des Geotextils und direkt anschließende Fertigstellung des Flächenfilters aus Dränagematerial - verzichtet werden, oder es müssen zugfeste Geotextilien eingesetzt werden, die entstehende Zugkräfte sicher aufnehmen und im Verankerungsgraben an der Böschungskrone in den Untergrund übertragen können. Anordnungen von Oberflächenstrukturen auf den Dichtungsbahnen oder ein Verkleben mit der Dichtungsbahn zur Erzielung einer größeren übertragbaren Scherkraft zwischen Dichtungsbahn und Geotextil, ergeben nur wenig Sinn. Bei Zunahme der Auflasten führt dies zwangsläufig zu unerwünschten Zugspannungen in der Dichtungsbahn. Die Ursache hierfür wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Die bisher angewendete Bauweise hat den Vorteil, daß sowohl das Geotextil als auch die Dichtungsbahn vor Windsog geschützt sind und Verwerfungen aus Temperaturdehnungen der Dichtungsbahn vermieden werden. Die Anlage von Kombinationsdichtungen mit größeren Böschungsneigungen erfordert eine andere Bauweise (siehe Bild 106 b).

Nach der Verlegung der Dichtungsbahn und des Geotextils ist dieses auf den Böschungen zusammen mit der Dichtungsbahn gegen Abheben durch Windsog zu sichern. Das Dränagematerial ist zunächst nur auf der Sohle und im Bereich des Böschungsfußes fertigzustellen und wird mit zunehmender Verfüllung der Deponie mit einem leichten Vorlauf vom Müllkörper aus auf den Böschungen aufgebracht. Eine Überbeanspruchung der Geotextilien durch Zugkräfte wird dadurch vermieden. Die Schwierigkeit bei dieser Bauweise besteht in der über die gesamte Betriebszeit vorzusehende Sicherung gegen Abheben der Dichtungsbahn und des Geotextils durch Windsog und Temperaturverwerfungen, die besonders im Sommer durch die hohen Temperaturdehnungen in der Dichtungsbahn auftreten können. Zudem könnte das abschnittsweise Aufbringen des Dränagematerials zu Behinderungen des Deponiebetriebes führen. Außerdem geht die Frostschutzwirkung des Dränagematerials verloren, wodurch unter Umständen Frostschäden im mineralischen Dichtungsmaterial

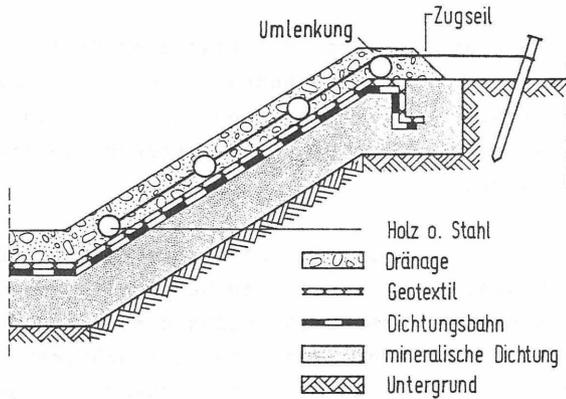
aufzutreten können. Aus diesem Grunde wäre ein dauerhafter Winterschutz vorzusehen. Um die Drainageschicht auf dem Geotextil auch bei größeren Böschungsneigungen ausführen zu können, ohne daß Zugspannungen in das Geotextil eingeleitet werden, wäre eine Abfangung der Zugspannungen außerhalb der Deponie denkbar. Bild 106 zeigt einen eigenen Vorschlag zur Aufnahme von Zugspannungen in der Bau- und Betriebsphase von Deponien, der ein vollflächiges Aufbringen des Drainagematerials auf den Böschungen erlaubt und gleichzeitig die Frostschutzwirkung für die mineralische Dichtung als auch Schutz vor Temperatureinwirkung, Windsog und Beschädigung während des Müllleinbaus bietet.

Der entscheidende Vorteil dieser Bauweise besteht aber in dem durch die Ausführung von Böschungen mit größerer Neigung gewonnenem Deponievolumen und damit der Möglichkeit, den Depo-niestandort besser zu nutzen. Außerdem ergeben sich durch diese Bauweise noch weitere Vorteile, die im nächsten Abschnitt behandelt werden. Im Bild 106 sind die Ausführungsvarianten dargestellt.



a: bei flacher Böschungsneigung

b: bei steiler Böschungsneigung



c: Abfangung von Zugspannungen

Bild 106: Herstellung einer Basisabdichtung mit Schutzschicht aus Geotextilien

4.4.3 Betriebs- und Endphase der Deponien

Nach Herstellung der Basisabdichtung und des Dränagesystems zur Erfassung und Behandlung der entstehenden Sickerwässer und nach erfolgter Abnahme durch die Behörden kann mit der Einlagerung von Abfall begonnen werden. Mit zunehmender Verfüllung der Deponie erhöhen sich die auf den Böschungen und auf der Deponiesohle wirkenden Auflasten. Durch die steigenden Auflasten treten Setzungen des Untergrundes auf. Die Kombinationsdichtung muß in der Lage sein, sich der entstehenden Setzungsmulde anzupassen. Aufgrund ihre plastischen Eigenschaften soll die mineralische Dichtungsschicht den auftretenden Verformungen folgen. Die Kunststoffdichtungsbahn sollte aufgrund ihres hohen Dehnvermögens ebenfalls in der Lage sein, die Verformungen schadlos zu ertragen. Um die aus den Dehnungen resultierenden Spannungen abbauen zu können und örtlich auftretende Spannungsspitzen und damit eine Überbeanspruchung der Dichtungsbahn zu vermeiden, muß gewährleistet sein, daß sich die Dehnungen großflächig auf die Dichtungsbahn übertragen.

Eine starke Verzahnung durch Oberflächenprofilierungen der Dichtungsbahn mit dem aufliegenden Dränmaterial bzw. der Schutzschicht aus Geotextilien steht diesem flächigem Abbau der Dehnungen in der Dichtungsbahn entgegen, da sie wie eine Einspannung wirkt.

Die Verzahnung mit dem plastischen, mineralischen Dichtungsmaterial ist weniger gravierend zu beurteilen, da sich dieses Material zusammen mit der Dichtungsbahn plastisch verformt und somit die auftretenden Dehnungen auf größeren Bereichen abgetragen werden können. Örtliche Überbeanspruchungen in der Dichtungsbahn durch Dehnungen sind aus diesem Grunde weniger zu befürchten.

Durch die zunehmenden Auflasten und durch beginnende Zersetzungsprozesse innerhalb des Deponiekörpers treten in diesem Sackungen auf. Durch diese Sackungen und die an der Deponiesohle einsetzenden Setzungen bewegt sich das auf den Deponieböschungen abgelagerte Material in Richtung Deponiesohle. Durch diese Bewegung werden Scherspannungen zwischen dem Dränagematerial bzw. der Schutzschicht aus Geotextil und der Dichtungsbahn verursacht. Können diese nicht von der Dichtungsbahn in das Dichtungsmaterial abgetragen werden, entstehen Zugspannungen in der Dichtungsbahn.

Ebenso erhöhen sich die auf den Böschungen wirkenden Vertikalspannungen. Dadurch steigen die Scherspannungen, die vom Dränmaterial bzw. dem Geotextil in die Dichtungsbahn eingeleitet werden. Da die Scherspannungen, die von der Dichtungsbahn in die mineralische Dichtungsschicht übertragen werden können, nicht im gleichen Maße ansteigen, entstehen in der Dichtungsbahn unerwünschte Zugkräfte. Ausgehend vom obigen Beispiel veranschaulicht das Bild 107 diesen Zusammenhang.

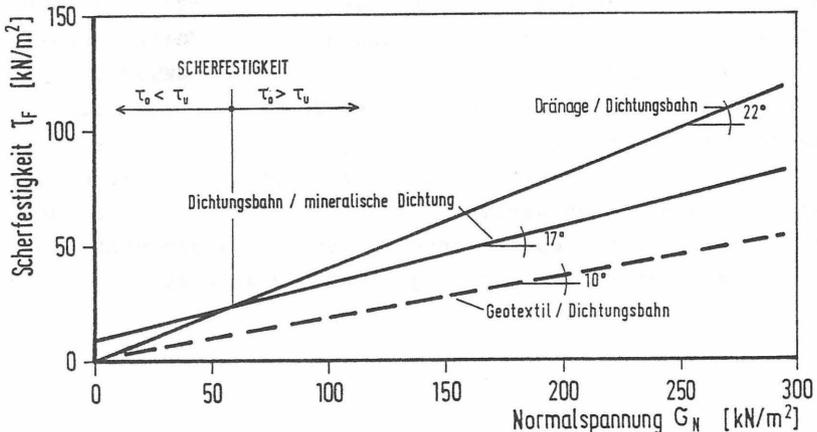


Bild 107: Übertragbare Scherspannungen zwischen den einzelnen Komponenten der Kombinationsdichtung im Bereich hoher Auflasten

Durch die Wahl der oben beschriebenen Bauweise, entsprechend Bild 106 b und c, ohne Verzahnungen zwischen dem Geotextil und der Dichtungsbahn ergeben sich zwei wesentliche Vorteile. Erstens können steilere Böschungen ausgeführt werden, zweitens wird bewußt eine Gleitfläche zwischen dem Geotextil und der Dichtungsbahn erzeugt, in der nur geringe Scherspannungen in die Dichtungsbahn und von dieser gefahrlos in den Untergrund übertragen werden.

Dadurch kann gewährleistet werden, daß Zugspannungen aus Sackungen nicht in die Dichtungsbahn eingeleitet werden und zum anderen die aus Setzungen an der Deponiesohle resultierenden Dehnungen sich großflächig verteilen und nicht zu einer örtlichen Überbeanspruchung der Dichtungsbahn führen.

Da die entstehenden Scherspannungen nicht vollständig in die Dichtungsbahn übertragen werden, entstehen zwangsläufig im Geotextil Zugspannungen, wenn das Geotextil nicht über genügend Dehnfähigkeit verfügt, um den Bewegungen des auf der Böschung zur Deponiesohle sackenden Materials zu folgen. Durch eine bewußt angelegte Dehnfalte, die sich mit den geschmeidigen Geotextilien leicht am oberen Rand der Böschung ausführen läßt, kann gewährleistet werden, daß die auftretenden Bewegungen vom Geotextil ausgeglichen werden und im gesamten Böschungsbereich die Schutzfunktion des Geotextils vollständig erhalten bleibt. Bei gleichmäßig ausgebildeten Muldendeponien hat die so erzeugte Gleitfläche, in der nur geringe Scherspannungen übertragen werden, keinen Einfluß auf die Gesamtstandsicherheit des Deponiekörpers, wenn vorausgesetzt wird, daß die Verfüllung der Deponie gleichmäßig erfolgt.

Bei Hangdeponien (siehe Bild 108a) kann die Gesamtsicherheit gegebenenfalls herabgesetzt werden, wenn nicht durch konstruktive Maßnahmen ein Gleiten des gesamten Deponiekörpers bereits verhindert wird (siehe Bild 108 b). Ebenso können bei Haldendeponien, deren Deponiebasis mit einem Geotextil als Schutzschicht versehen wird Probleme mit der Standsicherheit der Haldenböschungen auftreten (siehe Bild 108 c), weil am Böschungsfuß Schubkräfte in das Geotextil eingeleitet werden, die nicht von der Dichtungsbahn aufgenommen und abgeleitet werden können. Bei Überbeanspruchung des Geotextils reißt dieses und die Böschung rutscht ab. Durch konstruktive Maßnahmen kann eine solche Überbeanspruchung verhindert werden (siehe Bild 108 d).

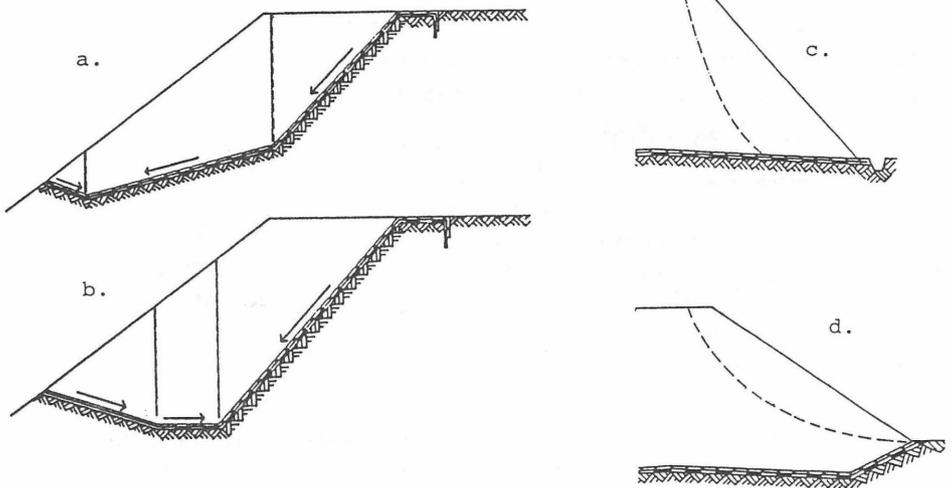


Bild 108: Verringerung der Gesamtstandsicherheit von Hang- und Haldendeponien bei Verwendung von Geotextilien und konstruktive Maßnahmen zur Sicherstellung der Standsicherheit

4.4.4 Oberflächenabdichtungen

Oberflächenabdichtungen dienen nach dem Verfüllen der Deponie zur Vermeidung von Regenwasserinfiltrationen und damit zur Verhinderung von erneuter Sickerwasserbildung. Zusätzlich haben sie die Aufgabe, den unkontrollierten Austritt der innerhalb des Müllkörpers entstehende Deponiegase zu verhindern. Die in Gasdrainagen abgeführten können gegebenenfalls einer gezielten Nutzung oder schadlosen Beseitigung zugeführt werden.

Nach dem Verfüllen der Deponie und dem Aufbringen eines Flächenfilters, der zur Fassung der Deponiegase dient, wird zwischen dem Flächenfilter und der nachfolgenden mineralischen Abdichtungsschicht ein Geotextil angeordnet, um die Filterstabilität zwischen der mineralischen Dichtungsschicht und dem grobkörnigen Filtermaterial zu gewährleisten. Bild 109 zeigt den Aufbau einer Oberflächenabdichtung.

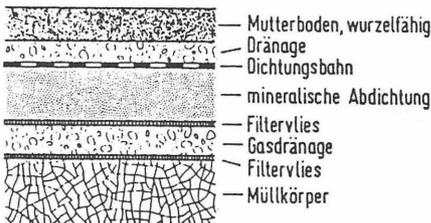


Bild 109: Aufbau einer Oberflächenabdichtung

Anschließend erfolgt die Herstellung der Kombinationsabdichtung aus mineralischer Dichtungsschicht und Kunststoffdichtungsbahn. Zur Ableitung und Fassung des Regenwassers folgt erneut ein Flächenfilter aus grobkörnigem Material. Getrennt durch ein Geotextil zur Gewährleistung der Filterstabilität wird darauf eine wurzelfähige Schicht aus Mutterboden aufgebracht, die der Wiederbegrünung des Deponiestandortes dient.

Auf eine Schutzschicht aus Geotextilien auf der Dichtungsbahn kann verzichtet werden, da ein Durchstanzen der Dichtungsbahn bei den nur geringen Auflasten aus der Regenwasserdränage und dem Mutterboden nicht zu befürchten ist.

Bei der Ausbildung der Oberflächenabdichtung auf Böschungen entstehen ebenso wie beim Bau der Basisabdichtung ebene Gleitflächen an der Ober- und Unterseite der Kunststoffdichtungsbahn. Außerdem sind ebene Trennflächen durch die aufgebrauchten Geotextilien vorgegeben. Durch die Geschmeidigkeit der Geotextilien ist eine ausreichende Verzahnung zwischen dem Geotextil, dem darunter befindlichem Filtermaterial und der nachfolgenden Bodenschicht zu erwarten. Eine Verzahnung der relativ starren Kunststoffdichtungsbahnen mit den angrenzenden Bodenschichten kann nur durch Oberflächenprofilierungen der Dichtungsbahnen erreicht werden.

Um eine möglichst große Böschungsneigung ausführen zu können, muß ebenso wie bei der Herstellung der Basisabdichtung sichergestellt werden, daß sich vor der Verlegung der Dichtungsbahn die Oberfläche des mineralischen Abdichtungsmaterials entsprechend den Einbaubedingungen in einem optimalen Zustand befindet. Wie bereits für die Herstellung der Basisabdichtungen erläutert, kann nur so erreicht werden, daß die vom Dränagematerial in die Dichtungsbahn eingeleiteten Scherspannungen auf die mineralische Dichtungsschicht übertragen werden. Kann die Adhäsion zwischen der Dichtungsbahn und dem mineralischen Dichtungsmaterial ausgenutzt werden, ist es möglich, durch eine Verzahnung des Dränagematerials mit Profilierungen auf der Dichtungsbahnoberseite Böschungsneigungen auszuführen, die 70 bis 80 % des Reibungswinkels des Dränagematerials betragen, ohne daß ein Abrutschen des Dränagematerials oder das Auftreten von Zugspannungen in der Dichtungsbahn zu befürchten sind. Ausgehend von einem Reibungswinkel von 36 Grad des Dränagematerials lassen sich je nach Oberflächenstruktur der Dichtungsbahn Böschungswinkel zwischen 25 und 30 Grad realisieren. Es ist dabei jedoch nachzuweisen, daß ein Abgleiten auf den Geotextilien nicht eintritt. Bild 110 zeigt die übertragbaren Scherkräfte zwischen Dichtungsbahn und Dichtungsmaterial sowie zwischen Dränagematerial und Dichtungsbahn im Bereich kleiner Auflasten.

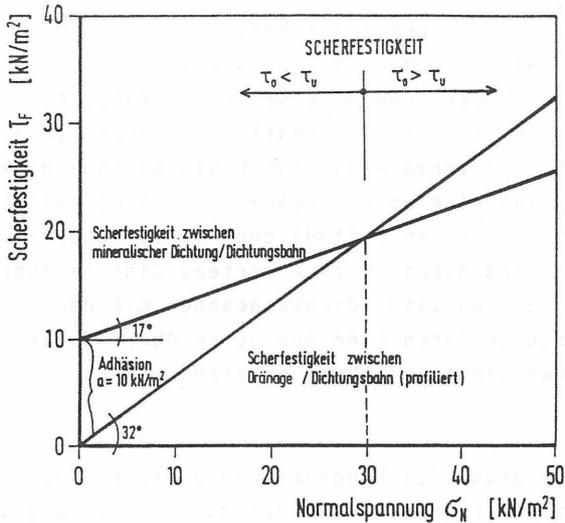


Bild 110: Beispiel für übertragbare Scherkräfte zwischen einer Dichtungsbahn und angrenzenden Materialien bei kleinen Auflasten

Kann die Adhäsion nicht für die Standsicherheitsbetrachtung in Ansatz gebracht werden, ist die Böschungeneigung maximal mit einem Böschungswinkel auszuführen, der dem Reibungswinkel zwischen der Dichtungsbahn und dem mineralischen Abdichtungsmaterial entspricht. Dadurch verringert sich das nutzbare Deponievolumen unter Umständen erheblich. Aus diesem Grunde sollten die erforderlichen Mehraufwendungen bei der Herstellung der mineralischen Dichtungsschicht für die Aktivierung der Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und mineralischem Dichtungsmaterial in Kauf genommen werden.

In Bild 111 sind die verschiedenen bei der Ausführung von Kombinationsdichtungen auf Böschungen zu beachtenden Einflüsse und Auswirkungen bei verschiedenen Bauweisen zusammengestellt.

VOR-UND NACHTEILE DER VERSCHIEDENEN BAUWEISEN VON KOMBINATIONSDICHTUNGEN

Bauweise bei flachen Böschungen	Steilere Böschungsneigungen							
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> Vorteil Aufbringen von Dränage und Schutzschicht vollflächig möglich keine Zugspannungen im Geotextil Frostschutz der min. Dichtung gewährleistet Befahren der Böschungen problemlos Schutz gegen Temperatur und Wind gegeben Einbaukontrolle durch qualifizierte Überwachung </td> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> Nachteil Böschungswinkel sehr klein (6 - 12 Grad) geringeres Deponievolumen </td> </tr> </table>	Vorteil Aufbringen von Dränage und Schutzschicht vollflächig möglich keine Zugspannungen im Geotextil Frostschutz der min. Dichtung gewährleistet Befahren der Böschungen problemlos Schutz gegen Temperatur und Wind gegeben Einbaukontrolle durch qualifizierte Überwachung	Nachteil Böschungswinkel sehr klein (6 - 12 Grad) geringeres Deponievolumen	<p style="text-align: center;">a. Ausführung mit fortlaufender Aufbringung der Dränage und Schutzschicht</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> Vorteil große Neigung möglich keine Zugkräfte im Geotextil kein Abrutschen der Dränage Gleitfläche zwischen DB und Geotextil keine zusätzl. Zugspannungen aus Sackungen und Setzungen in DB großflächiger Abbau von Dehnungen in der DB möglich </td> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> Nachteil kein Frostschutz für min. Dichtung kein Schutz gegen Temperatureinwirkung Sicherung gegen Windsog erforderlich Behinderung des Deponiebetriebes durch Dränageeinbau Beschädigung während des Deponiebetriebes möglich Qualitätssicherung nur bedingt gewährleistet </td> </tr> </table>	Vorteil große Neigung möglich keine Zugkräfte im Geotextil kein Abrutschen der Dränage Gleitfläche zwischen DB und Geotextil keine zusätzl. Zugspannungen aus Sackungen und Setzungen in DB großflächiger Abbau von Dehnungen in der DB möglich	Nachteil kein Frostschutz für min. Dichtung kein Schutz gegen Temperatureinwirkung Sicherung gegen Windsog erforderlich Behinderung des Deponiebetriebes durch Dränageeinbau Beschädigung während des Deponiebetriebes möglich Qualitätssicherung nur bedingt gewährleistet	<p style="text-align: center;">b. Ausführung mit Zugentlastung</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> Vorteil große Neigung möglich gute Standortnutzung großes Deponievolumen kein Zug im Geotextil Aufbringen der Dränage vollflächig Frostschutz der min. Dichtung Schutz vor Temperatureinfluß und Windsog Qualitätssicherung durch Fremd- und Eigenüberwachung gewährleistet Schutz während der Betriebsphase Gleitfläche zwischen Dichtungsbahn (DB) und Geotextil Abbau von Dehnungen großflächig möglich </td> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> Nachteil Aufwendige Bauweise, Zusatzkosten gegebenenfalls aufwendigere Sickerwasserfassung erforderlich Standsicherheit muß auch nach dem lösen der Zugentlastung gewährleistet sein </td> </tr> </table>	Vorteil große Neigung möglich gute Standortnutzung großes Deponievolumen kein Zug im Geotextil Aufbringen der Dränage vollflächig Frostschutz der min. Dichtung Schutz vor Temperatureinfluß und Windsog Qualitätssicherung durch Fremd- und Eigenüberwachung gewährleistet Schutz während der Betriebsphase Gleitfläche zwischen Dichtungsbahn (DB) und Geotextil Abbau von Dehnungen großflächig möglich	Nachteil Aufwendige Bauweise, Zusatzkosten gegebenenfalls aufwendigere Sickerwasserfassung erforderlich Standsicherheit muß auch nach dem lösen der Zugentlastung gewährleistet sein
Vorteil Aufbringen von Dränage und Schutzschicht vollflächig möglich keine Zugspannungen im Geotextil Frostschutz der min. Dichtung gewährleistet Befahren der Böschungen problemlos Schutz gegen Temperatur und Wind gegeben Einbaukontrolle durch qualifizierte Überwachung	Nachteil Böschungswinkel sehr klein (6 - 12 Grad) geringeres Deponievolumen							
Vorteil große Neigung möglich keine Zugkräfte im Geotextil kein Abrutschen der Dränage Gleitfläche zwischen DB und Geotextil keine zusätzl. Zugspannungen aus Sackungen und Setzungen in DB großflächiger Abbau von Dehnungen in der DB möglich	Nachteil kein Frostschutz für min. Dichtung kein Schutz gegen Temperatureinwirkung Sicherung gegen Windsog erforderlich Behinderung des Deponiebetriebes durch Dränageeinbau Beschädigung während des Deponiebetriebes möglich Qualitätssicherung nur bedingt gewährleistet							
Vorteil große Neigung möglich gute Standortnutzung großes Deponievolumen kein Zug im Geotextil Aufbringen der Dränage vollflächig Frostschutz der min. Dichtung Schutz vor Temperatureinfluß und Windsog Qualitätssicherung durch Fremd- und Eigenüberwachung gewährleistet Schutz während der Betriebsphase Gleitfläche zwischen Dichtungsbahn (DB) und Geotextil Abbau von Dehnungen großflächig möglich	Nachteil Aufwendige Bauweise, Zusatzkosten gegebenenfalls aufwendigere Sickerwasserfassung erforderlich Standsicherheit muß auch nach dem lösen der Zugentlastung gewährleistet sein							

5 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurden die vielfältigen Beanspruchungen und Anforderungen an Kombinationsdichtungssysteme aus Kunststoffdichtungsbahnen und mineralischen Dichtungsmaterialien erläutert. Da für die Standsicherheit und die Dauerhaftigkeit das Reibungsverhalten zwischen den einzelnen Komponenten des Dichtungssystems eine entscheidende Rolle spielt, wurden in Scherversuchen die übertragbaren Scherkräfte zwischen mehreren Kunststoffdichtungsbahnen mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur, verschiedenen bindigen und nichtbindigen Böden sowie Geotextilien experimentell ermittelt. Versuchstheorie und Versuchstechnik wurde grundsätzlich erläutert. Die aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse wurden in Empfehlungen zur Ermittlung von Scherparametern zusammengefaßt, und es wurden bezogene Reibungsbeiwerte angegeben, die es ermöglichen für erste Vorentwürfe und Planungen Annahmen für das zu erwartende Reibungsverhalten zwischen verschiedenen Böden und Dichtungsbahnen zu treffen.

Je nach Bauphase und auftretenden äußeren Belastungen von Kombinationsabdichtungen auf Böschungen ergeben sich unterschiedliche Beanspruchungen und ein unterschiedliches Kraftübertragungsverhalten zwischen Dichtungsbahnen und den angrenzenden Materialien. Die Zusammenhänge zwischen dem Kraftübertragungsverhalten zwischen Dichtungsbahnen und Böden, sowie deren Beeinflussung durch Witterungsbedingungen und den daraus sich ergebenden Beanspruchungen des gesamten Dichtungssystem wurden anhand eines Beispiels aufgezeigt. Es wurden Vor- und Nachteile der verschiedenen möglichen Bauweisen bei unterschiedlichen Böschungsneigungen erläutert und beschrieben, wie durch geeignete Maßnahmen eine standsichere und dauerhafte Kombinationsdichtung auf Böschungen hergestellt werden kann.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Landesamt für Wasser und Abfall NRW : Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen
Landesamt für Wasser und Abfall NRW
Auf dem Draap 25, 4 Düsseldorf 1
- [2] Knippschild, F.W.: Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen
Beiheft zu Müll u. Abfall, Nr. 22
E. Schmidt Verl. Berlin 1985
- [3] Drescher, J. : Deponiedichtungen für Sonderabfalldeponien
Arbeitspapier, Teil I und II
Müll und Abfall, 7. / 8. 1988,
E. Schmidt Verl. Berlin 1988
- [4] Reuter, E. : Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers
Mitteilungen des Inst. f. Grundbau u. Bodenmechanik TU Braunschweig, Heft Nr. 18, 1985
- [5] Simons, H. : Grundlagen der Bodenmechanik I - III
Studienunterlagen
Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig 1984
- [6] Günter, K. : Bemessungsgrundlagen für PEHD-Kunststoffbahnen auf Böschungen
Foik, G. :
Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik
und Umwelttechnik, Hamburg 1988

- [7] Knippschild, F.W.: Stand der Technik der Abdichtung von Deponien mit HDPE Dichtungsbahnen aus werkstoffspezifischer Sicht
Beiheft zu Müll und Abfall Nr. 15
E. Schmidt Verl. Berlin 1979
- [8] Zirpke, K. : Technische Mechanik starrer Körper
Kummer, K. 3. Auflage, Verlag Finkentscher Co.
Darmstadt 1980
- [9] Börner, P. : Statik, Reibung
6. Auflage, Carl Hauser Verlag, 1973
- [10] Kezdi, A. : Bodenmechanik, Bd. 1 - 3
VEB Verlag f. Bauwesen, Budapest,
Berlin, 1964
- [11] Terzaghi, K. : Die Bodenmechanik in der Baupraxis
Peck, R. B. Springer Verlag, Berlin, 1961
- [12] Kezdi, A. : Handbuch der Bodenmechanik
Teil 1-3, VEB Verlag f. Bau-
wesen, Budapest, Berlin 1969
- [13] Muhs, H. : Bodenuntersuchungen für Ingenieur-
Schultze, E. bauten
Springer Verlag, Berlin, New York,
2. Auflage, 1967
- [14] Smoltczyk, H. U.: Grundbautaschenbuch
3. Auflage, Teil 1
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn,
Berlin 1980
- [15] Terzaghi, K. : Soil mechanics in engineering
practice
New York, 1948
- [16] Caquot, A. : Grundlagen der Bodenmechanik
Kerisel, J. Springer - Verlag, Berlin, 1967

- [17] Mogami, I. : On the angle of internal friction of
Yoshikoshi, H. coarse materials
Proc. 3rd. Budapest Conf. of Soil
Mechanics and Foundation Eng. 1968,
p. 190 - 196
- [18] Teferra, A. : Beziehung zwischen Reibungswider-
stand, Lagerungsdichte und Sondier-
widerstand nichtbindiger Böden
Forschungsbericht TH. Aachen 1975
- [19] Lundgren, H. : Hauptprobleme der Bodenmechanik
Brinch Hansen Berlin, Heidelberg, 1960
- [20] Jänke, S. : Zusammendrückbarkeit und Scherfestig-
keit nichtbindiger Erdstoffe - ihre
quantitative Ermittlung mit Hilfe
einfacher Kennwerte und Feststel-
lungen der sie bestimmenden Einfluß-
faktoren. Baumaschine u. Bautechnik,
Jahrg.15, 1968, Heft 3, S.91 - 101
und Heft 4, S. 144
- [21] Schultze, E. : Der Reibungswinkel nichtbindiger Bö-
den
Der Bauingenieur 43, 1968, H. 9,
S. 313
- [22] Petermann, H. : Zusammenhang zwischen Scherverschie-
bung, Dichte und Scherwiderstand bei
nichtbindigen Böden
Deutsche Wasserwirtschaft 1939,
Nr. 10, S. 441 - 447
- [23] Casagrande, L. : Über die Scherfestigkeit von Böden
Bodenmechanik und neuzeitl. Strassen-
bau
Schriftenreihe "Strasse" Band 16,
Volk und Reich Verlag Berlin 1939

- [24] Turnbull, J.M. : The shearing resistance of soils as determined by direct shear tests at a constant rate of strain
Proceedings 2. Int. Conf. Soil Mechanics a. Foundation Engineering, Rotterdam, 1948, S. 211 - 214.
- [25] Müller-Vonmoos : Das Quellverhalten der Tone
Mitteilungen des Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Zürich, Nr. 133, 1988
- [26] Lagaly, G. : Grundzüge des rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineralsuspensionen
Mitteilungen des Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Zürich, Nr. 133, 1988
- [27] Lambe, T.W. : The engineering behavior of compactated clay
Journal Soil Mechanics and Foundation Engineering, May 1958, ASCE
- [28] Potyondy, J. G. : Skin friction between various soils and construction materials
Geotechnique, Vol. 11, No. 4, 1961
- [29] Rowe, P. W. : The stress dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact
Proc. Roy. Soc. A.269, pp. 500 - 527, 1962
- [30] Whitman, R. V. : Soil Mechanics
Lambe, T. W. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1969

- [31] Batereau, Ch. : Über den Reibungswinkel zwischen
Lattermann, hochpolymeren Flächengebilden und
Boden
Wasserwirtschaft / Wassertechnik 22,
1972, Nr. 7, S. 234 - 235
- [32] Batereau, Ch. : Der Reibungswinkel zwischen Folie und
nichtbindigem Lockergestein
Wasserwirtschaft / Wassertechnik 11,
1976, S. 394 - 395
- [33] Batereau, Ch. : Der Reibungsbeiwert zwischen Folie
und Erdstoff
Wissenschaftliche Zeitschrift der
Technischen Universität Dresden 22,
1973, Heft 6, S. 1107 - 1111
- [34] Balthaus, H. G. : Geomechanisches Verhalten von Kunst-
Meseck, H. stoffdichtungsbahnen
Bautechnik 64, S. 58 - 63,
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn,
Berlin, 1987
- [35] Williams, N. D. : Bestimmung von Reibungswinkeln
zwischen Geotextilien, Geomembranen
und verwandten Produkten
Third International Conference on
Geotextiles, Vienna, Austria, 1986
- [36] Deguette, G. : Prüfung des Reibungsverhaltens von
Mathieu, G. Boden und Geotextilien oder Geomem-
branen mit einem Schergerät 30 cm x
30 cm
Proceedings III. International
Conference of Geotextiles, Vienna,
Austria, 1986, Vol. IV, pp. 1251 -
1256

- [37] Giroud, J.-P. : Geotextilien
Schweizerische Bauzeitung, Jahrg.
96, 1978, Heft 42, S. 785-794
- [38] Martin, J. P. : Experimental friction evaluation of
Koerner, R. M. slippage between geomembranes, geo-
Whitty, J. E. textiles and soils
Proceedings Intern. Conf. on Geomem-
branes Denver; USA, Session 3A,
S. 191 - 195
- [39] Lafleur, J. : Frictional characteristics of geotex-
Sall, M. S. tiles with compacted lateritic
Ducharme, A. gravels and clays
Proceedings of Geosynthetic Confe-
rence, New Orleans, USA 1987
- [40] Wernick, E. : Bestimmung von Bodenkennwerten in ei-
nem parallel geführten direkten
Schergerät
Die Bautechnik 9 / 1979, S. 307 - 312

Richtlinien und Empfehlungen

- [41] Landesamt für : Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen
Wasser und Abfall NRW Landesamt für Wasser und Abfall NRW
Auf dem Draap 25, 4 Düsseldorf 1
- [42] Arbeitsaus- : Empfehlungen des Arbeitsausschusses
schuss Ufer- für Ufereinfassungen, EAU 1985
einfassungen Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
München 1985
- [43] Jessberger, H.L.: Empfehlungen des Arbeitskreises
"Geotechnik der Deponien und Altlasten" der Deutschen Gesellschaft für
Erd- und Grundbau e.V
Bautechnik 65 (1988), H. 9. W. Ernst & Sohn, Berlin
- [44] Nieders. : Kombiniertes Basisabdichtungssystem
Umweltminister Abdichtung von Deponien für Siedlungs-
abfälle
Referat für Umweltberichterstattung
und Öffentlichkeitsarbeit, Archiv-
str. 2, 3000 Hannover 1
- [45] Stief, K. : Deponiebasisabdichtungen
Erfahrungen, Stand der Technik,
Forschung
Beiheft zu Müll und Abfall, Heft 15
E.Schmidt Verlag, Berlin 1979.
- [46] Zitscher, F.F.: Empfehlungen für die Anwendungen von
Kunststoffen in Erd- und Wasserbau
Die Bautechnik, 52 Jahrg. 1975, Nr. 12

NORMEN:**A: Baugrund**

DIN 1054	1969	Baugrund; Zulässige Belastung des Baugrundes
DIN 1080	1980	Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauwesen
DIN 4022, Blatt 1	1969	Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels
DIN 4084	1974	Standsicherheitsberechnungen von Böschungen
DIN 18121, Blatt 1	1969	Baugrund; Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung
DIN 18122, Blatt 1	1969	Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen); Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
DIN 18123	1971	Baugrund; Untersuchung von Bodenproben. Korngrößenverteilung
DIN 18124	1973	Baugrund; Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpknometer
DIN 18125	1975	Baugrund; Bestimmung der Dichte des Boden
DIN 18126	1976	Baugrund; Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster dichtester Lagerung

DIN 18127	1972	Baugrund; Untersuchung von Bodenproben. Proctorversuch
DIN 18137	1972	Baugrund; Bestimmung der Scherfestigkeit
DIN 18196	1970	Erdbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen der Bodengruppen

B: Kunststoff - Dichtungsbahnen

DIN 16726	1986	Kunststoffdachbahnen, Kunststoff-Dichtungsbahnen; Prüfungen
DIN 53455	1981	Prüfung von Kunststoffen; Zugversuch

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik

- Nr. 76-1 Scheffler, E. : Die abgesteifte Baugrube berechnet mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Wand und Boden, 1976
- Nr. 78-2 Frank, H. : Formänderungsverhalten von Bewehrter Erde - untersucht mit Finiten Elementen, 1978 *
- Nr. 79-3 Schnell, W. : Spannungen und Verformungen bei Fangedämmen, 1979
- Nr. 80-4 Ruppert, F.-R. : Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie - Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik, 1980
- Nr. 81-1 Schuppener, B. : Porenwasserüberdrücke im Sand unter Wellenbelastung auf Offshore-Bauwerken, 1981 *
- Nr. 6 Wolff, F. : Spannungen und Verformungen bei Asphaltstraßen mit ungebundenen Tragschichten, 1981
- Nr. 7 Bätcke, W. : Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum, 1982
- Nr. 8 Meseck, H
 Schnell, W. : Dichtungswände und -sohlen, 1982 *
- Nr. 9 Simons, H.
 Ruppert, F.-R. : Entwicklung geeigneter Verfahren zum Messen der physikalischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen auf Baustellen, 1982 *



IGB TUBS

- Nr. 10 Beckmann, U. : Einflußgrößen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen, 1982
- Nr. 11 Papakyriakopoulos, P. : Verhalten von Erd- und Steinschütt-dämmen unter Erdbeben, 1983
- Nr. 12 Sondermann, W. : Spannungen und Verformungen bei Bewehrter Erde, 1983
- Nr. 13 Meseck, H. : Sonderheft zum 10-jährigen Bestehen des Instituts, 1984
- Nr. 14 Raabe, W. : Spannungs-Verformungsverhalten überkonsolidierter Tone und dessen Abhängigkeit von ingenieurgeologischen Merkmalen, 1984
- Nr. 15 Fruchtenicht, H. : Zum Verhalten nichtbindigen Bodens bei Baugruben mit Schlitzwänden, 1984
- Nr. 16 Knüpfer, J. : Schildvortrieb bei flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, 1984
Meseck, H.
- Nr. 17 N.N. : Ablagerung umweltbelastender Stoffe, Fachseminar 06. - 07. Februar 1985, Braunschweig *
- Nr. 18 Simons, H. : Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers, 1985 *
Reuter, E.
- Nr. 19 Meseck, H. : Dynamische Pfahltests, Fachseminar 23. - 24. Oktober 1985
- Nr. 20 Meseck, H. : Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten, Fachseminar 06.-07. November 1986*

- Nr. 21 Balthaus, H. : Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethode, 1986
- Nr. 22 Kayser, R. : Untersuchungen zur Deponierung von Meseck, H. Braunkohlenaschen, 1986
 Rösch, A.
 Hermanns, R.
- Nr. 23 Meseck, H. : Dichtwände und Dichtsohlen, Fachseminar 02. - 03. Juni 1987
- Nr. 24 Krause, Th. : Schildvortrieb mit erd- und flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, 1987
- Nr. 25 Meseck, H. : Mechanische Eigenschaften mineralischer Dichtwandmassen, 1987
- Nr. 26 Reuter, E. : Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren, 1988
- Nr. 27 Wichert, H.-W. : Der Einfluß der Alterung auf die Tragfähigkeit historischer Spick-Pfahl-Gründungen, 1988
- Nr. 28 Geil, M. : Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand, 1989
- Nr. 29 Kruse, Th. : Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen, 1989
- Nr. 30 Rodatz, W.
 u.a. : Sonderheft zum 15jährigen Bestehendes Instituts, 1989
- Nr. 31 Rodatz, W.
 Beckefeld, P.
 Sehrbrock, U. : Standsicherheiten im Deponiebau / Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen, Fachseminar am 19./20. März 1990 in Braunschweig



IGB-TUBS

- Nr. 32 Knüpfer, J. : Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen, 1990
- Nr. 33 Beckefeld, P. : Schadstoffaustrag aus abge bundenen Reststoffen der Rauchgasreinigung von Kraftwerken - Entwicklung eines Testverfahrens, 1991
- Nr. 34 He, G. : Standsicherheitsberechnungen von Böschungen, 1991
- Nr. 35 Rodatz, W. : Probenentnahme bei der Erkundung von Sehrbrock, U. Verdachtsflächen (Altlasten), Fachseminar am 13. September 1991 in Braunschweig
- Nr. 36 Kahl, M. : Primär- und Sekundärspannungszustände in überkonsolidiertem Ton - Am Beispiel eines im Hamburger Glimmerton aufgefahrenen Tiefdükers, 1991
- Nr. 37 Rodatz, W. : Standsicherheiten im Deponiebau, Fachseminar Hemker, O. am 30./31. März 1992 in Braunschweig Voigt, Th.
- Nr. 38 Rodatz, W. : Dynamische Pfahltests, Fachseminar am Meier, K. 21./22. Januar 1991 in Braunschweig
- Nr. 39 Rösch, A. : Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gelände - Entwicklung von Meßsystemen und Vergleich verschiedener Auswerteverfahren

* = vergriffen