

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig



Heft Nr. 40

IGB·TUBS

**Prüfung von Schutzlagen
für
Deponieabdichtungen aus Kunststoff**

von
Ulrich Sehrbrock

Braunschweig 1993

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

Vorwort des Herausgebers

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig ist seit vielen Jahren mit Problemstellungen des Deponiebaues in praktischer Tätigkeit in enger Zusammenarbeit mit Planern, Aufsichtsbehörden und Bauausführenden befaßt. Mit der wissenschaftlichen Bearbeitung von wichtigen Fragestellungen aus der Praxis, hoffen wir, einen Beitrag zum Bau immer sicherer Deponien liefern zu können.

Neu zu errichtende Deponien werden mit einem Abdichtungssystem, bestehend aus einer mineralischen Dichtung und einer Kunststoffdichtungsbahn, versehen. Zur sicheren Abführung des Deponiesickerwassers ist zwischen dem Dichtungssystem und dem einzulagernden Abfall eine Drainageschicht aus Kies herzustellen. Da die Kunststoffdichtungsbahn durch den Drainagekies schon während des Einbaues oder aber infolge der Belastung durch den Abfall zerstört werden kann, wird gefordert, daß auf der Kunststoffdichtungsbahn eine Schutzschicht einzubauen ist.

Eine anerkannt ausreichende Schutzwirkung hätte eine 10 cm dicke Sandschicht. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, daß beim Einbau der Drainageschicht, z. B. durch die Einwirkung der Baufahrzeuge, einzelne Kieskörner durch die Sandschicht hindurch bis auf die Kunststoffdichtungsbahn gedrückt werden. Daher werden in der Praxis Schutzlagen aus Geotextilien unterschiedlicher Art verwendet, die auch mit Bentonit oder Sand gefüllt sein können.

Es hat sich jedoch gezeigt, daß identische Schutzschichten von verschiedenen prüfenden Instituten oder Ingenieurbüros trotz bestehender Durchführungsbestimmungen für die Versuche und der vorgegebenen Bewertungskriterien unterschiedlich beurteilt wurden.

Herrn Dr.-Ing. Ulrich Sehrbrock hat mit der vorliegenden Arbeit Aussagen über die Zuverlässigkeit der üblichen Versuche gemacht und Empfehlungen für zukünftige Versuchsdurchführungen erarbeitet, die zur zuverlässigen Dimensionierung von Schutzlagen beitragen können.

Braunschweig, im April 1993



Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

**Testing of protective layers
for
disposal site insulations composed of synthetic materials**

Ph.D-thesis

of

Dipl.-Ing. Ulrich Sehrbrock

Summary

The applicability of the time-dependend plate-loading test for determining the effectivity of protective layers for plastic sealing strips was evaluated. A series of experiments were carried out to ascertain how reproducible the results are and to determine the sensitivity of the method for differentiating the effect of various protective layers. An objective assessment was made possible by using a specially devised scanning- and interpretation method.

In theory and practice it was demonstrated that the employment of computer-controlled scanning- and evaluation methods is suitable for a reliable assessment of the samples. The deviation caused by these methods were much lower than those caused by the recommended use of manual measurements.

The series of experiments show that a single trial of the time-dependend plate-loading test is not sufficient for an exact assessment of a protective layer. However, an extensive survey of the deformation and evaluation of several trials serve to recognize qualitative and quantitative differences in the effect of different protective layers.

Since no feasible alternative to the time-dependend plate-loading test has

been developed up to date, several parallel experiments should be used and evaluated spatially using an objective method in order to obtain a reliable test of protectiveness.

The further development of simple trials (index trials) is recommended for a less complicated experimental procedure, and several attempts in this respect are outlined. In spite of its drawbacks, the time-dependend plate-loading test is seen as an important aid for checking the transferability in between methods.

It can be assumed that the present research activities, which to a large extent are based on the described aspects, will lead to further findings and will result in a broad basis for determining the protective layer depending on the various requirements of each disposal site. Until then, care must be taken to choose materials and products with the help of experimental proof of suitability by using evaluation criteria on the safe side, so that only those components are employed which meet the standards for the envisaged period of time.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	1
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Ziele der Arbeit.....	7
2. Beanspruchung von Kunststoffdichtungsbahn und Schutzschicht.....	8
2.1 Beanspruchungen insgesamt.....	8
2.2 Mögliche Dehnungen infolge Setzungen.....	10
3. Prüfverfahren für geotextile Schutzlagen.....	13
3.1 Allgemeines.....	13
3.2 Prüfung der Wirksamkeit einer Schutzlage nach BAM.....	18
3.3 Prüfung der Wirksamkeit einer Schutzlage nach ÖNORM S 2076.....	20
3.3.1 Prüfung der Pyramidendurchdrückkraft.....	20
3.3.2 Drucktopfversuch.....	22
3.4 Prüfung der Wirksamkeit einer Schutzlage in den USA.....	22
3.5 Bewertung der Prüfmethode und Grenzwerte.....	25
3.5.1 Ansatz der Prüfmethode.....	25
3.5.2 Zulässige Beanspruchung einer PEHD-Kunststoffdichtungsbahn.....	27
4. Vorversuche.....	34
4.1 Kleinräumige Lastverteilung (Pufferwirkung).....	34
4.2 Großräumige Lastverteilung.....	36
4.2.1 Allgemeines.....	36
4.2.2 Untersuchungen zum Einfluß des Wassergehaltes des Untergrundes.....	37
4.2.3 Konsequenzen für weitere Versuche.....	45
5. Versuche im Drucktopf ϕ 300 mm.....	47
5.1 Allgemeines.....	47
5.2 Versuchsdurchführung.....	47
5.3 Auswertung.....	51
5.4 Rechnergesteuerte Meßwertaufnahme... ..	58
5.4.1 Allgemeine technische Daten.....	58
5.4.2 Meßgenauigkeit des gesamten Abtastsystems.....	60
5.4.3 Meßintervalle.....	65
5.4.4 Abtastbilder und ihre Auswertung.....	71

5.4.5 Aussagekraft der Ergebnisse aus der rechner-	
gesteuerten Meßwertaufnahme und -auswertung.....	76
5.4.5.1 Einfluß der systembedingten Ungenauigkeiten.....	76
5.4.5.2 Eignung der punktuellen Abtastung zur	
Bewertung einer Fläche.....	77
5.4.5.3 Vergleich mit einer manuellen Auswertung	
nach der BAM-Richtlinie.....	81
5.4.5.4 Zusammenfassende Bewertung.....	90
5.5 Einflüsse des Untergrundes.....	91
5.6 Reproduktionsversuche.....	109
5.6.1 Versuchsdurchführung und Ziele der Versuchsreihe.....	109
5.6.2 Darstellung der Ergebnisse.....	111
5.6.2.1 Größe der auszuwertenden Fläche.....	111
5.6.2.2 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.....	115
5.6.2.3 Auswirkungen des Untergrundes.....	122
5.6.3 Zusammenfassende Bewertung.....	126
5.7 Versuche mit unterschiedlichen Schutzlagen.....	129
5.7.1 Versuchsbedingungen und Versuchsmatrix.....	129
5.7.2 Darstellung der Ergebnisse.....	132
5.7.3 Bewertung der Ergebnisse.....	134
5.7.4 Bedeutung der Kunststoffdichtungsbahn.....	139
5.8 Versuche mit künstlichen Belastungsbildern.....	143
5.8.1 Versuchsbedingungen und Versuchsmatrix.....	143
5.8.2 Darstellung der Ergebnisse.....	144
5.8.2.1 Kugeln.....	144
5.8.2.2 Reliefplatte.....	149
5.8.3 Zusammenfassende Bewertung.....	152
5.9 Gesamtbewertung der Ergebnisse.....	156
5.9.1 Allgemeines.....	156
5.9.2 Prüfdauer.....	157
5.9.3 Art der Schutzlage.....	166
5.9.4 Art des Untergrundes.....	167
5.9.5 Prüftemperatur.....	171
5.10 Wölbversuche.....	172
5.10.1 Allgemeines.....	172
5.10.2 Wölbversuch zur Untersuchung der Veränderung der	
mechanischen Eigenschaften der Dichtungsbahn im	
Zeitstandlastplattendruckversuch.....	178
5.10.2.1 Versuchsbeschreibung.....	178
5.10.2.2 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse.....	180

6. Folgerungen.....	186
6.1 Gesamtbeurteilung des Zeitstandlastplattendruckversuches.....	186
6.1.1 Aussagekraft der Ergebnisse.....	186
6.1.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse.....	187
6.1.3 Auswertungskriterien.....	188
6.2 Mögliche Alternativen.....	189
6.2.1 Allgemeines.....	189
6.2.2 Alternativen zum Zeitstandlastplattendruckversuch.....	191
6.2.2.1 Versuch mit Gruppen von Belastungskörpern (Laststempelversuch).....	191
6.2.2.2 Bestimmung der lastabhängigen Dicke geotextiler Schutzschichten in einem Punktlastversuch.....	194
6.2.3 Empfehlungen und Ausblick.....	202
7. Zusammenfassung.....	207

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

A_{Topf}	[m ²]	Grundfläche des Drucktopfes
b	[m]	Bogenlänge eines Kreisabschnittes
γ_M	[kN/m ³]	Wichte des Abfalls
d_{ELA}	[mm]	Dicke der Elastomer-Platte (Unterlage)
d_K	[cm]	Dicke einer Kiesschutzschicht
d_{KDB}	[mm]	Dicke der Kunststoffdichtungsbahn
d_{Rest}	[mm]	unter Belastung verbleibende Dicke eines Geotextils
d_S	[cm]	Dicke einer Sand-Schutzschicht
d_{STY}	[mm]	Dicke der Styrodur-Platte (Unterlage)
D_{Pr}	[-]	Verdichtungsgrad
h	[m]	Stich eines Kreisabschnittes
h_w	[mm]	Wölbhöhe
HDPE		engl. Bezeichnung für Polyethylen hoher Dichte (PEHD)
i		Variable zur Bezeichnung eines Meßintervalls oder eines Meßpunktes
KDB		Abkürzung für Kunststoffdichtungsbahn
l_{i1}	[mm]	horizontale Entfernung zweier Punkte
l_{i2}	[mm]	kürzeste Entfernung zweier vertikal gegeneinander verschobener Punkte
n	[-]	Anzahl der Messungen
n_A	[-]	Anzahl der Meßachsen
n_p	[-]	Anzahl der Perioden einer Sinusschwingung
P_{Auflast}	[kN/m ²]	zu erwartende Müllauflast
PE		Polyethylen
PEHD		Polyethylen hoher Dichte
PP		Polypropylen
P_p	[kPa]	einzustellender Prüfdruck beim Zeitstandlastplatten- druckversuch
r	[mm]	Biegeradius
r_K	[mm]	Radius eines Belastungskörpers
r_{min}	[mm]	festgestellter, minimaler Krümmungsradius
r_w	[mm]	Radius der Einspannfläche beim Wölbversuch
R_i	[mm]	Krümmungsradius am Punkt i
s	[m]	Sehnenlänge eines Kreisabschnittes
T	[%]	Tonanteil
U	[%]	Schluffanteil

w	[%]	Einbauwassergehalt
w_{Pr}	[-]	optimaler Wassergehalt (nach DIN 18 127)
$w_{0,95Pr}$	[-]	Wassergehalt bei 95 % Proctordichte
α	[Grad]	Winkel zur Bestimmung eines Kreisabschnittes
α_i	[Grad]	Winkeländerung eines Polygonzuges am Punkt i
δh_i	[mm]	Höhendifferenz zweier benachbarter Punkte
δl_i	[mm]	Differenz zwischen horizontaler und tatsächlicher Entfernung zweier vertikal versetzter Punkte
ϵ	[%]	Dehnung der Dichtungsbahn
ϵ_{1-2}	[%]	im Bereich 1-2 gemessene Dehnung
ϵ_{cal}	[%]	errechnete mittlere Dehnung
ϵ_i	[%]	Dehnung des Meßintervalls i
ϵ_{KS}	[-]	Dehnung einer Deponiebasis bei kreissegmentförmiger Setzungsmulde
ϵ_r	[%]	Dehnung der Randfaser einer Kunststoffdichtungsbahn infolge Krümmung
ϵ_{rges}	[%]	Gesamtdehnung der Randfaser einer Dichtungsbahn
$am\epsilon_{DC}$	[%]	arithmetisches Mittel der Dehnungen mit Dichtungsbahn und Schutzlage C
$am\epsilon_{D0}$	[%]	arithmetisches Mittel der Dehnungen mit Dichtungsbahn ohne Schutzlage
$am\epsilon_{0C}$	[%]	arithmetisches Mittel der Dehnungen ohne Dichtungsbahn mit Schutzlage C
$max\epsilon$	[%]	nach BAM vorgegebene, maximal zulässige Dehnung
$max\epsilon_{DC}$	[%]	max. Dehnung mit Dichtungsbahn und Schutzlage C
$max\epsilon_{D0}$	[%]	max. Dehnung mit Dichtungsbahn ohne Schutzlage
$max\epsilon_{0C}$	[%]	max. Dehnung ohne Dichtungsbahn mit Schutzlage C
ϵ_{wb}	[%]	Wölbogendehnung
ϵ_{zul}	[%]	vorgeschlagener Grenzwert der Dehnungen
ϑ	[Grad]	Lastausbreitungswinkel
σ_{Basis}	[kN/m ²]	Vertikalspannung an der Deponiebasis
φ	[Grad]	Reibungswinkel des Bodens

Prüfung von Schutzlagen für Deponieabdichtungen aus Kunststoff

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Kunststoffdichtungsbahnen sind heute beim Bau von Deponien ein wichtiger Bestandteil der Abdichtungssysteme. Sie werden sowohl an der Deponiebasis als auch bei der Abdeckung von Abfallkörpern eingebaut. Häufig wird die Dichtungsbahn dabei als Teil einer sogenannten Kombinationsdichtung eingesetzt, findet – besonders in Oberflächenabdichtungen – aber auch als alleiniges Dichtungselement Verwendung. Bei jedem Einsatz kommt dieser künstlichen Dichtung eine hohe Bedeutung zu, da sie als einziger Teil des Dichtungssystems absolut flüssigkeitsdicht ist.

Entsprechend dieser Bedeutung wird die Herstellung und der Einbau der Kunststoffdichtungsbahnen von Anfang an streng überwacht. Beginnend bei der Anlieferung des Granulats über die Herstellung der Bahnen bis zum Verlegen und Verschweißen auf der Baustelle, wird der gesamte Ablauf durchgehend kontrolliert und protokolliert. Bereits an den Rohstoff sind genau formulierte Anforderungen gestellt, welche mit der zugehörigen Art der Kontrolle in verschiedenen Richtlinien festgeschrieben sind. Als solche sind zu nennen:

- [1] Deponiebasisabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen, Landesamt für Wasser und Abfall, NRW, Mai 1985
- [2] Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsabdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Stand Februar 1992

Als Werkstoff hat sich aufgrund seiner Beständigkeit Polyethylen hoher Dichte (PEHD, Dichte etwa zwischen 0,932 und 0,942 g/cm³) durchgesetzt. Als Mindestdicke wird für die Kunststoffdichtungsbahn in [2] 2,5 mm festgelegt.

Aufbau und Herstellung der Deponieabdichtungssysteme sind in verschiedenen Richtlinien der Bundesländer (siehe dazu [3], [4], [5]) und seit neuerer Zeit auch für sogenannte besonders überwachungsbedürftige Abfälle in der bundesweit verbindlichen Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA-Abfall) [6] geregelt.

Die Kunststoffdichtungsbahn ist nach diesen Regelwerken als oberstes Element der Kombinationsdichtung auf der mineralischen Dichtungsschicht einzubauen (siehe Bild 1.1 und 1.2). Über der Dichtungsbahn folgt zur Fassung und Ableitung des Sickerwassers die Dränschicht. Diese hat aus einem Kies 16/32 mm zu bestehen. Die grobe Körnung soll sicherstellen, daß trotz möglicher Verockerung der Hohlräume über eine möglichst lange Zeit ein wasserwegsamer Porenraum in der Dränschicht erhalten bleibt.

Bei Schütthöhen zur Zeit betriebener oder projektierter Hausmülldeponien von 35 m bis zu über 100 m ergeben sich bei einer Müllwichte von ca. $\gamma_M = 15 \text{ kN/m}^3$ an der Deponiebasis Spannungen von ca. $\sigma_{\text{Basis}} = 500 \text{ kN/m}^2$ bzw. bis zu über $\sigma_{\text{Basis}} = 1.500 \text{ kN/m}^2$. Diese Belastungen müssen über die Kiesdränschicht durch die Kunststoffdichtungsbahn in den Untergrund geleitet werden.

Zum Schutz der mit hohem Aufwand hergestellten und eingebauten Dichtungsbahn vor Überbeanspruchungen oder gar Perforationen ist bei den vorgegebenen Abdichtungssystemen zwischen Kies und Dichtung eine Schutzschicht anzuordnen. Diese Schutzschicht sollte idealer Weise in der Lage sein, die sich infolge der Auflast unter den einzelnen Körnern des Drainagekieses ergebenden, quasi punktförmigen Belastungen innerhalb ihrer Bauhöhe soweit zu verteilen, daß der Untergrund - mit der daraufliegenden Dichtungsbahn - nur noch flächig beansprucht wird.

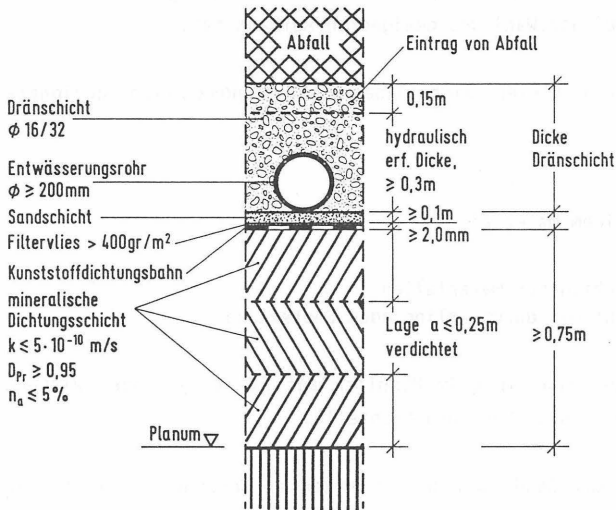


Bild 1.1: Aufbau Basisabdichtungssystem, aus [3]

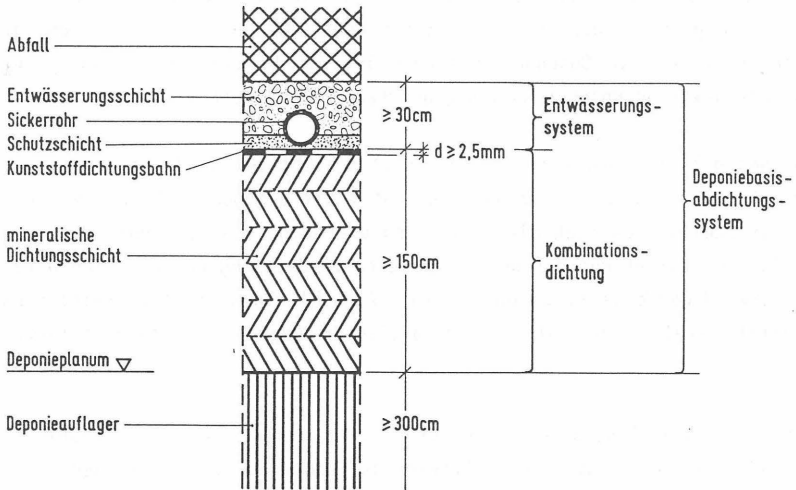


Bild 1.2: Aufbau Basisabdichtungssystem, aus [6]

Die Art der Schutzschicht für Kunststoffdichtungsbahnen ist in den derzeit geltenden Richtlinien nicht verbindlich festgelegt, so daß der Planer freie Hand bei der Wahl des geeigneten Aufbaus hat.

Mehrere Möglichkeiten bieten sich dabei als grundsätzlich geeignete Alternativen an:

- Sandschicht
- Schicht aus bindigem Material
- Geotextil
- Kombination verschiedener Materialien
(z.B.: Sandschicht mit darunterliegendem Geotextil)

Jede dieser Möglichkeiten birgt im Hinblick auf die erreichbare Wirkung und in bezug auf den Einbau Vor- und Nachteile.

Eine Schutzschicht aus Sand, welche bei einer entsprechenden Dicke (ab ca. $d_s = 10$ cm) die zur Zeit denkbar beste Schutzlage darstellt, ist nur mit sehr großen Schwierigkeiten einzubauen. Zum einen ist die Gefahr einer Beschädigung der Dichtungsbahn während des Einbaus der dünnen Schicht relativ groß, zum anderen ist schwer zu kontrollieren, inwieweit die eingebaute Dicke der Sandschicht – ein entscheidender Parameter für die erreichbare Schutzwirkung – während des Einbaus der Dränageschicht verändert wurde. In Böschungsbereichen ist ein Einbau einer Sandschicht ab einer gewissen Böschungsneigung überhaupt nicht mehr möglich.

Gleiches gilt für den Einbau einer Schutzschicht aus bindigem Boden. Bei der Wahl eines solchen mineralischen Materials ergeben sich noch weitere Schwierigkeiten, da sich die Verteilung über eine Fläche schwieriger als bei Sand gestaltet und darüber hinaus eine Verdichtung erforderlich wird. Die notwendigerweise zu gewährleistende Auswahl eines absolut steinfreien Materials stellt sich als ein zusätzlicher großer Unsicherheitsfaktor dar.

Wegen der bei Einbau einer mineralischen Schutzschicht in Kauf zu nehmenden, nicht zu umgehenden Schwierigkeiten wird häufig ein Geotextil als Schutzlage vorgeschlagen. Diese Produkte bieten gegenüber den anderen aufgezeigten Möglichkeiten in einigen Aspekten erhebliche Vorteile. So

werden Geotextilien industriell - und damit wie die zu schützenden Kunststoffdichtungsbahnen durchgehend kontrollierbar - hergestellt, sie sind leicht zu transportieren und vor allem einfach und schnell auf der Baustelle zu verlegen.

Entwickelt aus Geotextilien für andere Zwecke (Filtern, Trennen) haben verschiedene Hersteller mittlerweile die unterschiedlichsten Formen und Kombinationen von Geotextilien für einen Einsatz als Schutzlagen im Deponiebau auf den Markt gebracht. Es werden angeboten:

- vernadelte Vliesstoffe (siehe Bild 2.1)
- Verbundstoffe aus miteinander vernadeltem Gewebe und Vlies (siehe Bild 2.2)
- mit Bentonit gefüllte, miteinander vernadelte Vliesstoffe "Bentonitmatte" (siehe Bild 2.3)

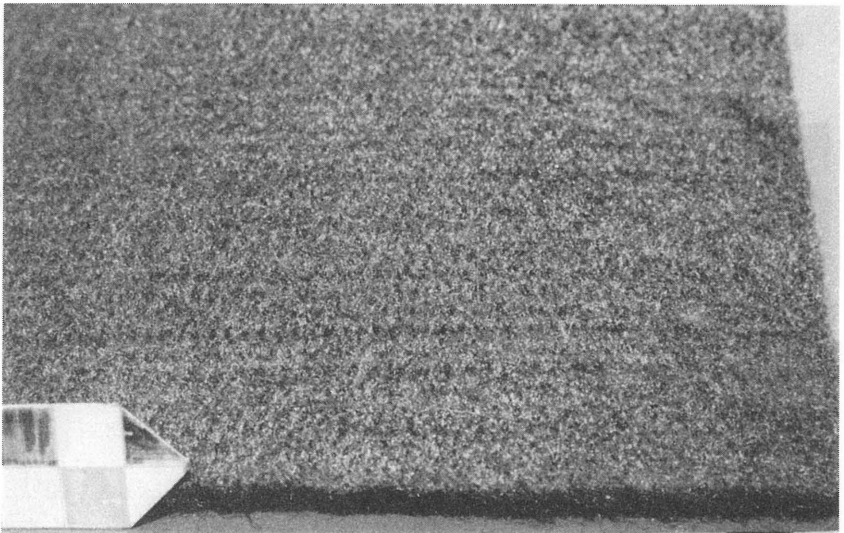


Bild 2.1: Vlies

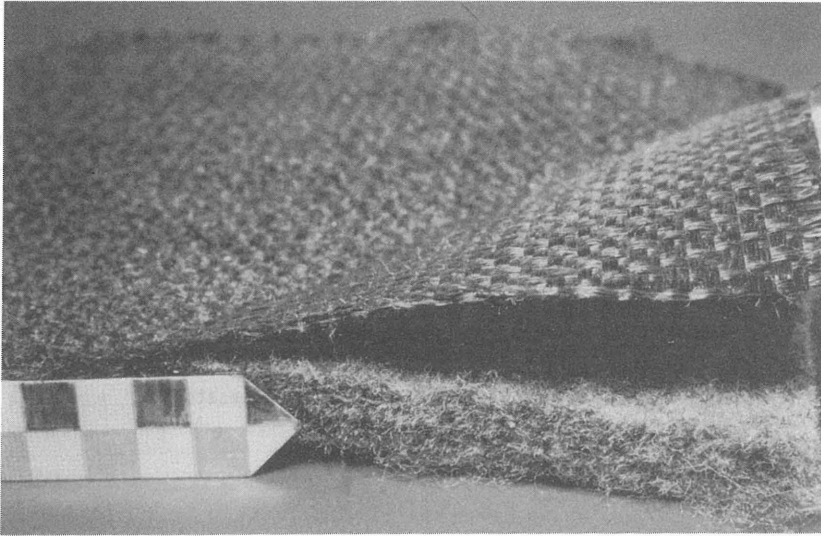


Bild 2.2: Verbundstoff

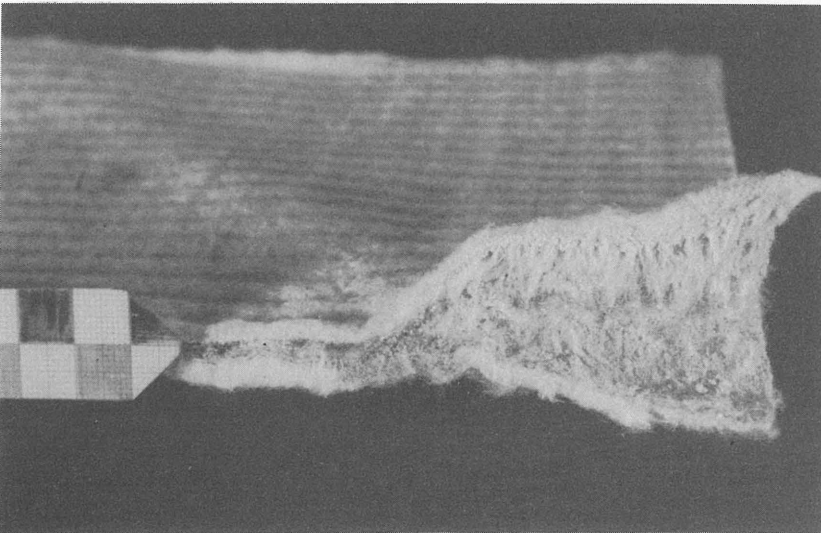


Bild 2.3: Bentonitmatte

Bisher gibt es zur Bemessung oder Prüfung der geforderten Schutzlage weder einheitliche Richtlinien noch einheitliche Prüfvorschriften. Bei der Bewertung der Wirkung, besonders der geotextilen Schutzschichten, führte die sich hieraus ergebende Unsicherheit dazu, daß verschiedene Büros und Institute mit unterschiedlichen Methoden prüften und die Eignung des Prüflings nach unterschiedlichen Kriterien feststellten. Aus dieser Situation wurden im Jahre 1990 in Abstimmung mit dem AK 11 und AK 14 der DGEG in einem von der Naue-Fasertechnik GmbH & Co. KG initiierten Workshop Vorgaben erarbeitet, nach welchen die Eignung einer geotextilen Schutzlage experimentell nachgewiesen werden konnte. Diese Vorgaben wurden im wesentlichen von der BAM in den Zulassungsscheinen für Kunststoffdichtungsbahnen aufgenommen und finden sich nun auch in der Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen [2] wieder.

1.2 Ziele der Arbeit

Die Eignung geotextiler oder mineralischer Schutzlagen wird derzeit experimentell in einem sogenannten Zeitstandlastplattendruckversuch (im folgenden auch gelegentlich als Druckversuch bezeichnet) nachgewiesen. Durchführung und Auswertung des entsprechenden Versuches geschehen gemäß oder – besonders was die Art der Auswertung angeht – in Anlehnung an die Richtlinien der BAM [2].

Trotz der mittlerweile weitgehend gelungenen Vereinheitlichung der Versuchsdurchführung, zeigen sich in der Praxis noch immer Diskrepanzen bei der Bewertung von Produkten. Solche Unterschiede in den Ergebnissen treten bei Prüfungen gleicher Schutzlagen sowohl laborintern als auch zwischen den unterschiedlichen Prüfinstanzen auf. Mit dieser Arbeit werden daher drei wesentliche Ziele verfolgt:

1. Untersuchung der Aussagefähigkeit der in der BAM-Richtlinie vorgeschlagenen Prüf- und Auswertungsmethode.

Dazu werden die Aussagekraft der Versuchsergebnisse und die Grenzen des Auswertverfahrens herausgearbeitet. Desweiteren wird die Übertragbarkeit der in einem Laborversuch – welcher einen Ausschnitt des Abdichtungssystems simuliert –

produzierten Resultate auf die in der Situation vor Ort herrschenden Verhältnisse beurteilt.

2. Darstellung der Wirkung verschiedener Schutzlagen.

Durch mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführte Auswertungen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche werden sowohl die Wirkung verschiedener Schutzlagen als auch die Sensibilität der Versuchsmethodik im Hinblick auf die Möglichkeit, Effekte unterschiedliche Produkte zu unterscheiden, dargestellt. In diesem Zusammenhang werden Schutzlagen und Schutzlagenkombinationen verwendet und gegenübergestellt, die zum Teil in den entsprechenden Richtlinien empfohlen werden, bzw. die bereits in Deponien eingebaut wurden. Anhand der in den Wirkungen der verschiedenen Schutzlagen feststellbaren Unterschiede lassen sich unter Umständen Hinweise für eine zweckvolle Weiterentwicklung der speziellen Produkte oder Produktkombinationen ableiten.

3. Entwicklung von anderen Auswertmethoden und einfacheren, alternativ anwendbaren Prüfverfahren

Durch die Versuche sollen Grundlagen für die Schaffung einfacherer Prüfverfahren erarbeitet werden. Auf der Basis dieser Ergebnisse werden die Ansätze einiger denkbarer, anderer Prüfverfahren entwickelt. Derartige, zum Teil stark idealisierte Tests könnten möglicherweise zukünftig die Beurteilung der Wirkung einer geotextilen Schutzlage auf eine einfachere und schnellere Art und Weise als mit dem Zeitstandlastplattendruckversuch zulassen.

2. Beanspruchungen von Kunststoffdichtungsbahn und Schutzschicht

2.1 Beanspruchungen insgesamt

Kunststoffdichtungsbahn und Schutzschicht sind an einer Deponiebasis oder auch in einer Abdeckung einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt. Diese

Beanspruchungen überlagern oder verstärken sich zum Teil in ihrer Wirkung. Bei einigen Arten von Belastungen kann eine zwischen Dränageschicht und Dichtungsbahn eingebaute Schutzschicht entlastend für die polymere Dichtung wirken. Dies kann der Fall sein bei (vergl. [8]):

- UV-Einstrahlung
- Temperaturbelastungen
- Angriff durch Nagetiere und Pflanzen
- Belastungen durch den Einbaubetrieb
(besonders zu Beginn der Einlagerung)
- Beanspruchungen durch Bewegungen des Dränagematerials
(insbesondere auf Böschungen durch Verschleppung des
Kieses infolge Setzung/Zersetzung des Abfalls)
- Punktförmige Beanspruchung infolge der Müllauflast durch
eine grobe Körnung des Dränmaterials (z.B. Kies 16/32)

Andere Arten von Belastungen treten gleichermaßen für Dichtungsbahn und Schutzschicht auf und werden im Blick auf die Kunststoffdichtungsbahn nicht von der Eigenschaft der Schutzlage beeinflusst. Dies gilt für (vergl. [9]):

- Höhe der Müllauflast
- Zeitdauer der Belastung
- Chemische Beanspruchung durch Zusammensetzung des
Sickerwassers
- Temperatur an der Deponiebasis
- Beanspruchungen durch die Einbaumstände
(z.B.: Temperatur beim Verlegen)
- Beanspruchungen durch Setzungen des Untergrundes

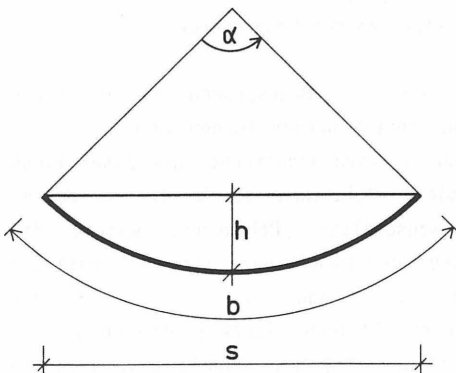
Da einige - insbesondere mechanische - Beanspruchungen in ihrer Größenordnung nur äußerst grob abgeschätzt werden können (z.B.: infolge von Setzungen aufgezwungene Dehnungen), wird angestrebt, die zusätzliche Beanspruchung aus der punktförmigen Belastung durch die einzelnen Dränagekörner möglichst ganz auszuschalten. Dehnungen, welche die Kunststoffdichtungsbahn bis zu einer gewissen Grenze (lt. [2] zulässig $\leq 3\%$) aufzunehmen durchaus in der Lage ist, ohne daß die Funktionsfähigkeit eingeschränkt wird, bleiben bisher praktisch zu 100 Prozent der Beanspruchung durch Setzungsvorgängen vorbehalten, aufgrund derer unvermeidlich Dehnungen in der Dichtungsbahn entstehen.

2.2 Mögliche Dehnungen infolge von Setzungen

Setzungen der Deponiebasis können, abhängig von der Geologie des Untergrundes und von der Schütthöhe, erhebliche Ausmaße annehmen. Berechnungen ergeben für Deponien mit Schütthöhen zwischen ca. 50 und 100 m, je nach Eingang der Randbedingungen, Setzungsbeträge um 1,5 m bis zu etwa 2,0 m.

Die Größe der Setzungen allein läßt allerdings noch keine Rückschlüsse auf eventuelle Beanspruchungen der an der Basis verlegten Kunststoffdichtungsbahn zu. Entscheidend sind dafür die Setzungsdifferenzen und die Entfernungen, innerhalb derer sich diese Unterschiede einstellen. In der Regel werden daher die Setzungsbeträge der Deponieränder mit der in der Mitte des Deponiekörpers zu erwartenden maximalen Setzung zu berücksichtigen sein.

In den nachfolgenden Berechnungen wird die sich einstellende Dehnung ϵ_{ks} [-] unter der Annahme ermittelt, daß sich eine ursprünglich gerade Deponiebasis mit der Breite s so verformt, daß sich eine kreissegmentförmige Setzungsmulde ergibt (aus [10]). Der Darstellung in Bild 3 können die in diesem Zusammenhang verwendeten Bezeichnungen entnommen werden. Die sich nach Beendigung der Setzung einstellende (Bogen-)Länge b ergibt sich in Abhängigkeit des Stiches h nach folgender Beziehung:



$$b = \sqrt{s^2 + 16 h^2 / 3} \quad (1)$$

$$b = (1 + \epsilon_{ks}) \cdot s \quad (2)$$

Bild 3: Kreissegment mit Bezeichnungen

In Tabelle 1 sind die geometrischen Größen s und h zusammengestellt, welche sich nach den obenstehend erläuterten Zusammenhängen unter Berücksichtigung verschiedener Dehnungen ϵ_{ks} ergeben. Die Ergebnisse zeigen, daß sich bei einer Dehnung von $\epsilon_{ks} = 0,03$ ($\approx 3\%$) Setzungsbeträge errechnen, die sich bei einem für eine Deponie nach heutigem Standard zulässigen Untergrund großräumig nicht einstellen. Bei Ansatz einer Setzungsdifferenz (Deponierand gegenüber -mitte) von 1,5 m ergibt sich für eine 300 m breite Deponiebasis unter den dargestellten Verhältnissen eine Längenänderung von $\epsilon_{ks} = 0,00007$ ($\approx 0,007\%$).

s [m]	$\epsilon_{ks} = 0,01$	$\epsilon_{ks} = 0,02$	$\epsilon_{ks} = 0,03$
	Stich h [m]		
100	6,1	8,7	10,7
200	12,3	17,4	21,4
300	18,4	26,1	32,1

Tabelle 1: Stich h in Abhängigkeit von s und ϵ_{ks}

In der Realität sind Basisabdichtungssysteme – im Gegensatz zu der in den vorstehenden Berechnungen zugrunde gelegten Geometrie – so angelegt, daß nach Abklingen der Setzungen (nach [3]) noch ein Mindestquergefälle von 3 %, bzw. ein Längsgefälle von $\geq 1,5\%$ vorhanden ist. Für Deponien, die nach außen hin entwässern, bedeutet dies, daß das Basisabdichtungssystem mit einer entsprechenden Überhöhung eingebaut werden muß. Bei Setzungen einer solchen Deponiebasis ergeben sich für das Dichtungssystem aufgrund der Geometrie rechnerisch Stauchungen (siehe Bild 4).

Reserven vorzuhalten für in ihrer Größenordnung und Verteilung nur mit Unsicherheiten berechenbare Setzungen, ist in jedem Fall erforderlich. Besonders in Übergangsbereichen (z.B.: Sohle-Böschung, Deponie- und/oder Bauabschnitte) sind mögliche Setzungsdifferenzen benachbarter Bereiche – und nur Setzungsdifferenzen beanspruchen die Dichtungsbahn – nur ungenau vorherzusagen und müssen so durch konstruktive Maßnahmen (Einbau geeigneter Materialien) sicher aufgefangen werden.

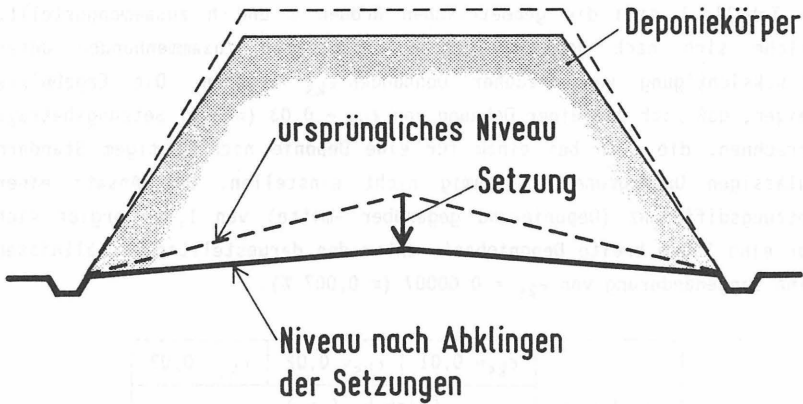


Bild 4: Setzungen einer überhöhten Deponiebasis

Es ist allerdings zu überlegen, ob nicht – zumindest für großflächige Bereiche, die hinsichtlich ihres Setzungsverhaltens relativ unproblematisch sind, wie Deponiesohle oder große Böschungen – ein Teil der insgesamt vertretbaren zulässigen Dehnung der Kunststoffdichtungsbahn zur Unterstützung einer nicht "perfekten" Schutzschicht herangezogen werden könnte. Um dies erlauben und planmäßig berücksichtigen zu können, sind Vorgehensweisen und Bewertungsmethoden zu entwickeln, die eine genaue Vorhersage der Wirkung der gewählten Schutzlage mit daraus resultierenden Verformungen für die Dichtungsbahn sicher ermöglichen.

3. Prüfverfahren für geotextile Schutzlagen

3.1 Allgemeines

Die Schutzwirkung von Geotextilien beruht auf zwei Mechanismen. Zum einen werden die Einzelkörner der Dränageschicht von den einzelnen Fasern des Vlieses eingehüllt, was zu einem Abpuffern der über das Einzelkorn anstehenden quasi punktförmigen Belastungen führt (s. Bild 5). Durch das das Kieskorn einhüllende Material wird die Aufstandsfläche des einzelnen Kornes auf der Kunststoffdichtungsbahn vergrößert. Zudem wird über die Zugfestigkeit im Zusammenwirken mit der Verhakung der Geotextilfasern untereinander eine Lastausbreitung innerhalb des Geotextils erreicht. Dies führt insgesamt zu einer Vergrößerung der Fläche, über welche die ursprünglich punktförmige Belastung mit für die Dichtungsbahn reduzierten Spannungen in den Untergrund weitergeleitet werden kann.

Neben dieser sehr kleinräumigen Lastverteilung unterhalb der einzelnen Körner kann mit einer geotextilen Schutzlage noch eine großräumigere Lastverteilung erreicht werden: Dadurch, daß beim Einsinken zweier benachbarter Einzelkörner das Geotextil innerhalb des Zwischenraumes dieser Einzelkörner gedehnt wird, wird die durch die Kieskörner punktförmig anstehenden Belastung infolge der Zugfestigkeit der geotextilen Schutzlage über Umlenkkräfte großräumiger verteilt (s. Bild 6). Diese Art der Lastabtragung wird umso bedeutender, je weiter die Einzelkörner in den Untergrund einsinken und die infolge der Zugfestigkeit lastverteilende Wirkung der Schutzlage aktivieren.

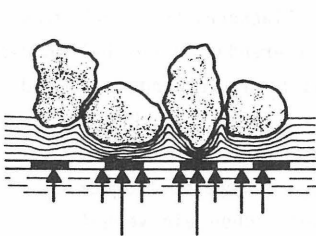


Bild 5: Puffern

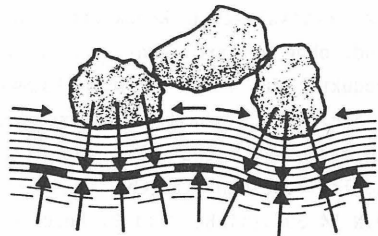


Bild 6: Verteilen

Zur Beschreibung, Klassifizierung und Prüfung von Geotextilien wurden verschiedene Verfahren entwickelt und standardisiert. Mit diesen Versuchen lassen sich die folgenden Eigenschaften eines Geotextils prüfen (aus [11]):

=> *Mechanische Eigenschaften*

- Masse pro Flächeneinheit und deren Homogenität
- Dicke und Kompressibilität
- Reißkraft, Reißdehnung und Kraftdehnungsverhalten
- Weiterreißkraft
- Durchschlagswiderstand
- Stempeldurchdruckversuch

=> *Beständigkeit und Langzeiteffekte*

- Kriechen
- Bakterielle Stabilität
- Chemische Stabilität
- UV-Stabilität

=> *Hydraulische Eigenschaften*

- Durchlässigkeit senkrecht zur Geotextilebene
- Durchlässigkeit in der Geotextilebene
- Wirksamer Porendurchmesser

Die Prüfverfahren, nach denen die mechanischen Eigenschaften der Geotextilien bestimmt werden, simulieren zum Teil Beanspruchungen, welche für Schutzschichten auf einer Kunststoffdichtungsbahn nicht zutreffen.

Die physikalischen Kennwerte, wie Masse pro Flächeneinheit und Dicke, sind, ohne weitere Kenntnisse der daraus resultierenden Eigenschaften der Produkte, für einen Schutzwirksamkeitsnachweis nicht verwendbar. Die das mechanische Verhalten untersuchenden Tests, wie die Prüfung von Zugfestigkeit und Dehnung (in Anlehnung an DIN 53 857), der Kegelfallversuch (siehe Bild 7) und der Stempeldurchdruckversuch (DIN 54 307)(siehe Bild 8) beschreiben im wesentlichen ein Verhalten der Geotextilien, welches bei einem Einsatz als Schutzlage nicht oder nur in geringem Maße gefordert ist. Eine Abschätzung der Wirksamkeit eines

Geotextils als Schutzlage läßt sich aus diesen Versuchen daher nicht ableiten.

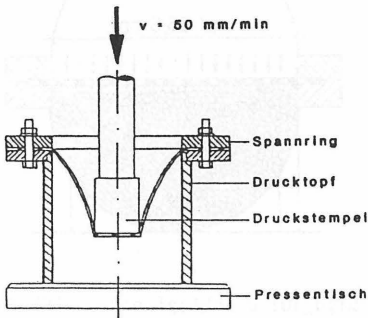


Bild 7: Stempeldurchdruckversuch nach DIN 54 307, [12]



Bild 8: Kegelfallversuch, aus [13]

Zur Untersuchung der Schutzwirkung von Geotextilien wurden daher an verschiedenen Büros und Instituten modifizierte oder speziell konstruierte Versuchseinrichtungen eingesetzt. Auf diese Weise wurde versucht, die Wirkung der Schutzlage und die Einflüsse unterschiedlicher Eigenschaften einzelner, die Schutzwirkung beeinflussender Größen, beispielsweise des Bodens (Wassergehalt, Scherparameter) oder des Kiesel (Kornform, Korngröße), zu erfassen. Beispielhaft sind nachfolgend Abbildungen der Prüfeinrichtung nach PUEHRINGER (siehe Bild 9), des Drucktopfes nach STEFFEN (siehe Bild 10), des Versuchsaufbaus nach KNIPSCHILD (siehe Bild 11) und eines Prüftopfes des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig (siehe Bild 12) wiedergegeben.

Die aufgeführten Beispiele machen deutlich, auf welche unterschiedlichen Arten das Problem angegangen wurde. Während Puehringer in einem vereinfachenden Versuch mit einem einzelnen künstlichen Druckstempel den Effekt einer im wesentlichen membranartig belasteten Schutzlage ermittelt, stellen die anderen Prüfeinrichtungen Nachbildungen eines mehr

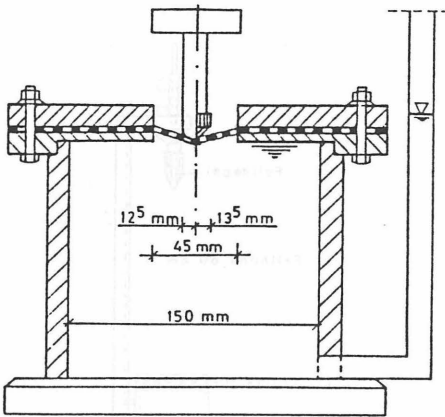


Bild 9: Prüfeinrichtung nach PUEHRINGER aus [14]

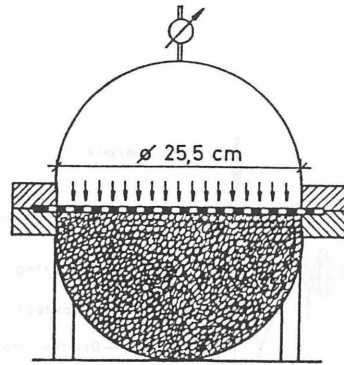
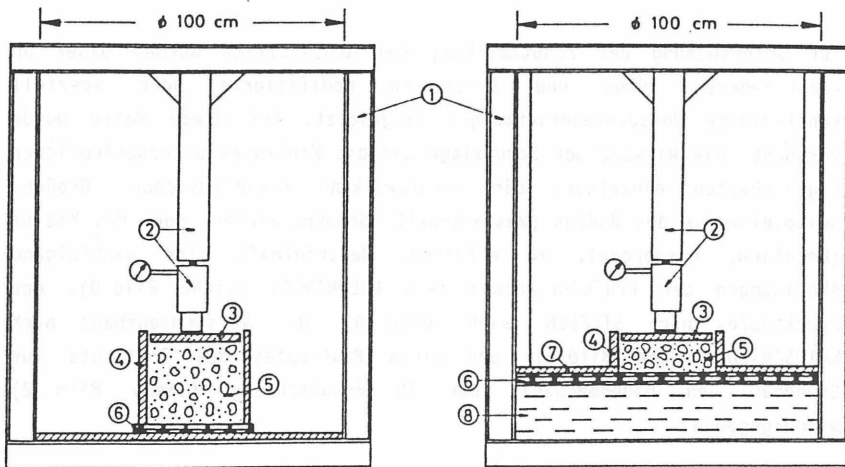


Bild 10: Drucktopf nach STEFFEN aus [15]



- 1 Druckrahmen
- 2 Belastungseinheit
- 3 Lastplatte $\varnothing$ 30 cm
- 4 Prüfbehälter

- 5 Kies 16/32 mm
- 6 Probe
- 7 Gegendruckplatte
- 8 Mineralische Dichtung

Bild 11: Modifizierter Lastplattendruckversuch nach KNIPSCHILD, aus [16]

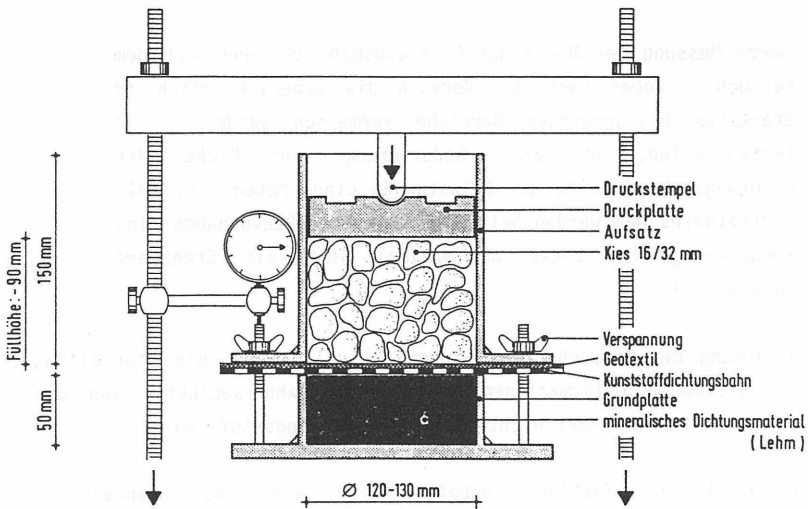


Bild 12: Prüftopf ϕ 130 mm des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, aus [10]

oder minder kompletten Ausschnittes des Abdichtungssystems dar. Nach Belastung des Systems wird jeweils durch Begutachtung des Zustandes der Kunststoffdichtungsbahn die Wirkung der Schutzlage festgestellt. Zur Beurteilung wurden bei den letztgenannten Prüfverfahren verschiedene Kriterien herangezogen:

- Falls eine Dichtungsbahn nach Ausbau direkte Beschädigungen der Oberfläche (Einkerbungen) aufweist, ist die Schutzwirkung des eingesetzten Geotextils als nicht ausreichend zu bewerten.
- Durch Beurteilung der nach den Versuchen registrierbaren Ausbeulungen der Dichtungsbahn ist festzustellen, ob die Dichtungsbahn während des Versuches örtlich stark gedehnt wurde. Dies wäre der Fall, wenn sehr stark ausgeprägte Ausbeulungen festgestellt werden oder wenn sich zwischen den einzelnen Ausbeulungen keine weichen Übergänge sondern abrupte Verformungen eingestellt haben.

- Durch Messung der Dicke der Dichtungsbahn vor und nach dem Versuch - wobei nach dem Versuch die augenscheinlich am stärksten beanspruchten Bereiche vermessen werden - ist festzustellen, ob eine Reduzierung der Dicke der Dichtungsbahn infolge der Belastungen eingetreten ist. (Als vertretbares Maß wurden bei einem konkreten Bauvorhaben eine Reduzierung der Dicke um maximal 10 % als Grenzwert angesetzt.)

Die Auswertung der Versuche geschah rein visuell, wobei die Beurteilung der feststellbaren Deformationen der Dichtungsbahn subjektiv von den Prüfern als hinnehmbar oder nicht mehr zulässig eingestuft wurden.

Da diese Praxis fachlich unbefriedigend war und zwangsläufig unterschiedliche Bewertungen mit sich brachte, wurde eine Vereinheitlichung sowohl der Prüfeinrichtungen als auch der Bewertungsmaßstäbe angestrebt. In der Richtlinie der BAM [2] wurde nun eine Vorgehensweise zur Prüfung von Schutzlagen definiert.

3.2 Prüfung der Wirksamkeit einer Schutzlage nach BAM

Die im folgenden zitierten Anforderungen und Bestimmungen sind als vorläufige Prüfverfahren und Anforderungen an die Schutzschicht titulierte, die am gegenwärtigen Stand des Wissens orientiert sind. Da es bisher noch keine Zulassungspflicht für Schutzschichten gibt, ist die Erfüllung der formulierten Anforderungen jeweils durch neutrale Prüfinstitutionen nachzuweisen.

Die Eignung bezüglich der mechanischen Schutzwirkung ist über einen Zeitstandlastplattendruckversuch nachzuweisen. Prüfgröße ist dabei die Beschaffenheit der Kunststoffdichtungsbahn nach der Belastung. Bei Deponieauflasten bis zu 600 kN/m^2 kann der nachstehend beschriebene Versuchsaufbau verwendet werden. Bei größeren Deponieauflasten ist über den Aufbau (Wahl der Unterlage) und die Versuchsbedingungen (Zeitraffer durch Überlast oder Temperatur) im Einzelfall zu entscheiden. aus [2]

Versuchsaufbau: Drucktopf von mindestens 30 cm Durchmesser

Schichtenaufbau (von oben nach unten):

- Druckplatte
- 5 cm Sand-Ausgleichsschicht
- 20 cm Dränageschicht (in der Regel Kies 16/32)
- Schutzlage
- Kunststoffdichtungsbahn (KDB)
- "Untergrund", Elastomer, $d = 2,0 \text{ cm}$
Härte 50° Shore-A

Temperatur 40°C

$$P_{\text{Prüfdruck}} P_p = P_{\text{Auflast}} \times 1,5$$

P_{Auflast} errechnet sich aus der geplanten maximalen Höhe der Deponie und der mittleren Dichte des Deponiekörpers. (In der Regel wird 15 kN/m^3 als Dichte des Müllkörpers angesetzt)

Versuchsdauer 1.000 Stunden

Neben der Auswertung des Versuches nach 1000 Stunden sollte die zeitliche Veränderung der in der KDB auftretenden lokalen Dehnungen nach 10 Std., 100 Std. etc. für eine Bewertung herangezogen werden. Dabei muß sich ein konvexer Kurvenverlauf im Dehnungs-Zeit-Diagramm ergeben, so daß auch für größere Zeiträume nur begrenzte Dehnungen zu erwarten sind.

Bewertungskriterium: Dehnung $\leq 0,25 \%$

Die Schutzschicht gilt als geeignet, wenn unmittelbar nach dem 1000-Std-Zeitstanddruckversuch, die dann in der 2,5 mm dicken, glatten Dichtungsbahn festgestellten Dellen höchstens maximalen Dehnungen von 0,25 % entsprechen (gerechnet unter der Annahme einer Kugelkalotte).

Die während des Versuches in der Kunststoffdichtungsbahn aufgetretenen Dehnungen können durch Vermessen eines zwischen Untergrund und Dichtungsbahn angeordneten Weichbleches ermittelt werden. Nach dem Versuch feststellbare lokale Dickenänderungen, Kerben, Risse und Perforationen sind nicht zulässig.

3.3 Prüfung der Wirksamkeit einer Schutzlage nach ÖNORM S 2076

Im Entwurf der ÖNORM S 2076 vom 1. September 1992 [17] werden im Kapitel 8, *Schutz der Dichtungsbahnen*, Schutzmaßnahmen gegen mechanische Beschädigungen der Kunststoffdichtungsbahnen gefordert. Die Prüfung geotextiler Schutzlagen ist im Anhang C geregelt, wobei zwei Methoden aufgenommen sind:

- C.1 Prüfung der Pyramidendurchdrückkraft (normativ)
- C.2 Drucktopfversuch (informativ)

3.3.1 Prüfung der Pyramidendurchdrückkraft

Bei diesem Versuch wird die zu prüfende geotextile Schutzlage (Mindestabmessungen 100 x 100 mm) auf eine glatte Aluminiumplatte gelegt und mit einem Druckstempel belastet. Der zylinderförmige Druckstempel mit einem Durchmesser von 25 mm hat an der Spitze die Form einer 4-seitigen Pyramide mit einem Spitzenöffnungswinkel von 90°. Der Versuchsaufbau ist in den Bildern 13.1 und 13.2 dargestellt.

Mit dem Versuch wird die Durchdrückkraft ermittelt. Der Druckstempel wird dazu mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/min}$ vorgefahren. Die Durchdrückkraft ist abzulesen, sobald die Probe perforiert ist und so ein Kontakt zwischen Stempel und Unterlage - angezeigt durch ein elektrisches Signal - entsteht.

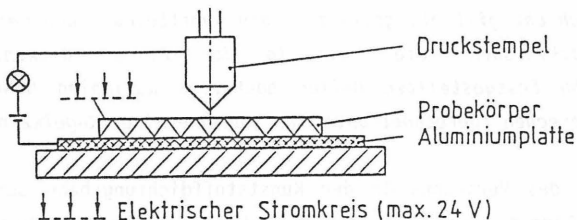


Bild 13.1: Versuchsaufbau Pyramidendruckversuch, aus ÖNORM S 2076 [17]

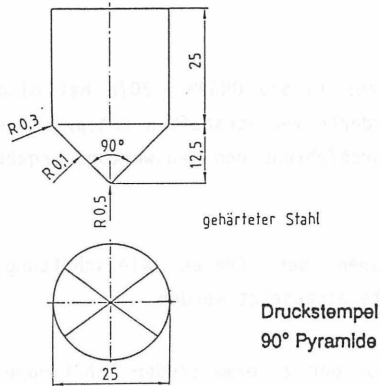


Bild 13.2: Druckstempel, aus ÖNORM S 2076 [17]

Aus mindestens 10 Proben ist die durchschnittliche Durchdrückkraft zu bestimmen. Der kleinste Einzelwert aus einer solchen Reihe muß den Anforderungen der Tabelle C.2 (wiedergegeben als Tabelle 2) genügen. In dieser Tabelle ist die erforderliche Mindest-Durchdrückkraft für geotextile Schutzlagen in Abhängigkeit der Körnung der vorgesehenen Dränage und der zu erwartenden Normalspannung (Auflast) aufgelistet.

Normalspannung σ_0 (kN/m ²)		erforderliche Mindest-Pyramidendurchdrückkraft für geotextile Schutzlagen in Abhängigkeit des Rund- korns			
		Größtkorn 16 mm	Größtkorn 26 mm	Größtkorn 32 mm	Größtkorn 45 mm
	$\sigma_0 < 150$	1000	1000	1000	1150
150 <	$\sigma_0 \leq 250$	1000	1000	1200	1520
250 <	$\sigma_0 \leq 350$	1000	1050	1250	2050
350 <	$\sigma_0 \leq 450$	1000	1150	1450	2350
450 <	$\sigma_0 \leq 600$	1000	1330	1770	2820
600 <	$\sigma_0 \leq 700$	1000	1510	1960	3150
700 <	$\sigma_0 \leq 800$	1000	1650	2050	3550

Tabelle 2: Mindest-Pyramidendurchdrückkraft, aus ÖNORM S 2076 [17]

3.3.2 Drucktopfversuch

Die Aufnahme des Drucktopfversuches in die ÖNORM S 2076 hat bisher nur informativen Charakter. Der geforderte Versuchsaufbau entspricht dem der BAM-Richtlinie. In der Versuchsdurchführung und -auswertung ergeben sich allerdings einige Unterschiede:

- Nach der ÖNORM kann neben der freien Kiesschüttung ausdrücklich eine Druckplatte eingesetzt werden.
- Die Prüflast ergibt sich aus der zu erwartenden Schütthöhe und der Dichte des Abfalls, ohne einen Erhöhungsfaktor (nach BAM 1,5) einzurechnen.
- Als Versuchsdauer sind 56 Tage (d.h. 1.344 Std. gegenüber 1.000 Std.) anzusetzen, ggfs. ist die Versuchszeit noch zu verlängern.
- Der Gutachter hat die in dem Weichblech konservierten Deformationen zu beurteilen. Ein konkreter Grenzwert ist nicht formuliert.

3.4 Prüfung der Wirksamkeit einer Schutzlage in den USA

Am Geosynthetic Research Institute (GRI) der Drexel University, Philadelphia, USA, werden Versuche zur Schutzwirksamkeit von Geotextilen in einem speziellen Drucktopf durchgeführt [18].

Bei diesen Tests werden drei an ihrer Spitze leicht angeschrägte Kegel in einem Abstand von 250 mm in einem Dreieck angeordnet. Die Kegel sind in einem Sandbett platziert, wobei die wirksame Höhe der Körper durch die Dicke der Sandschicht variiert wird. Über die Kegel werden geotextile Schutzlage und Kunststoffdichtungsbahn unter dem Deckel des Topfes angeordnet. Auf der Rückseite (Oberseite) der Dichtungsbahn wird über Wasser als Medium der Prüfdruck aufgebracht. In Bild 14.1 und 14.2 ist die Testapparatur dargestellt.

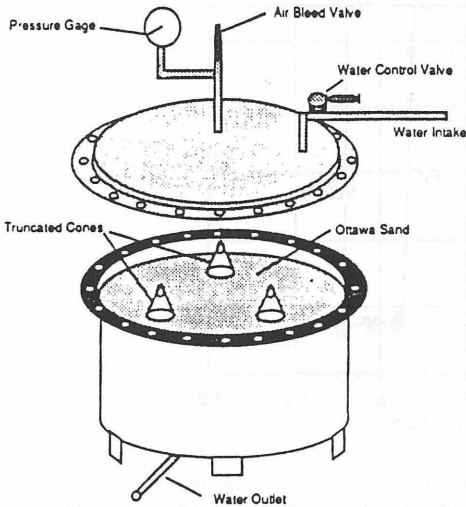


Bild 14.1: Drucktopf

des Geosynthetic Research Institute (GRI), aus [18]

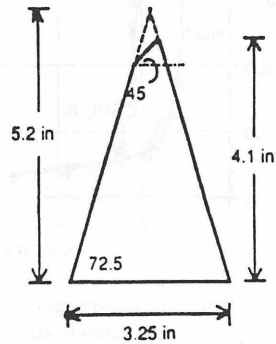


Bild 14.2: Kegel

Als Ergebnis einer Reihe von Versuchen ohne Schutzlagen lassen sich nach [18] die in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellten sogenannten kritischen Kegelhöhen für Dichtungsbahnen aus verschiedenen Materialien ableiten.

Dichtungsbahn Material Dicke [mm]		Kritische Kegelhöhe [mm]
PEHD	1,5	10
CSPE-R	0,9	18
PVC	0,75	70
VLDPE	1,0	89

Tabelle 3: Kritische Kegelhöhen für verschiedene Kunststoffdichtungsbahnen, aus [18]

Bild 15 zeigt das druckabhängige Verhalten der verschiedenen Kunststoffdichtungsbahnen für die in der Tabelle 3 zusammengestellten Werte. Bild 16 gibt die Wirkung geotextiler Schutzlagen an dem Beispiel der Dichtungsbahn aus PEHD wieder.

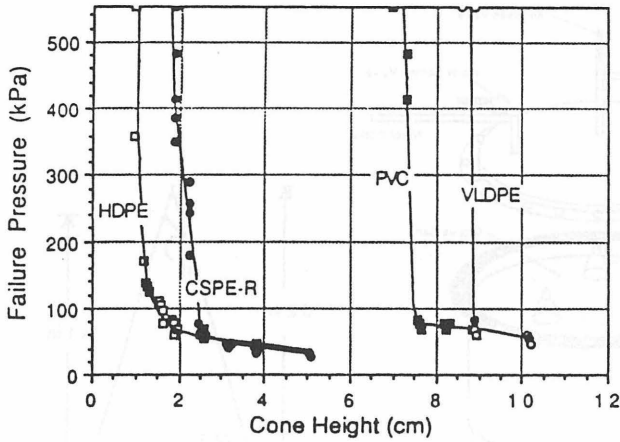


Bild 15: Druck bei Versagen in Abhängigkeit der Kegelhöhe
Dichtungsbahnen aus verschiedenen Materialien ohne Schutzlage

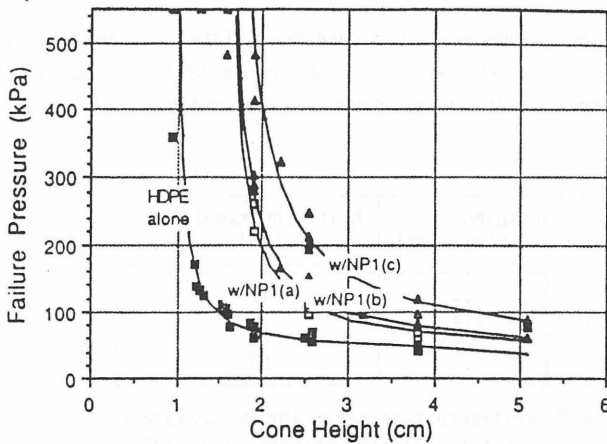


Bild 16: Druck bei Versagen in Abhängigkeit der Kegelhöhe
Dichtungsbahn aus PEHD ($d_{KDB} = 1,5 \text{ mm}$)
mit verschiedenen Schutzlagen

3.5 Bewertung der Prüfmethoden und Grenzwerte

3.5.1 Ansatz der Prüfmethoden

Die vorstehend beschriebenen, zur Zeit verwendeten Möglichkeiten die Wirkung von Schutzlagen zu testen, unterscheiden sich sowohl in der Versuchsdurchführung als auch im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse erheblich. Grundsätzlich lassen sich, was die Versuchsanlage angeht, zwei Arten unterscheiden:

1. Versuche, die unter Verwendung gefertigter Belastungskörper dazu angelegt sind, die für die Schutzwirkung entscheidenden Eigenschaften der Prüflinge zu erfassen (Indexversuche).

Reduziert auf eine einfach aufzubringende, in Art und Größe genau definierbare Belastung (Druckkörper, einzeln oder als Gruppen) liefern derartige Versuche reproduzierbare Ergebnisse, bei denen die Schutzlage die einzige, nicht über die Versuchsanlage einstellbare Veränderliche darstellt.

2. Versuche, die so realistisch wie möglich die Einsatzbedingungen der Schutzlagen nachbilden.

Bei dieser Art des experimentellen Eignungsnachweises wird das geplante Deponieabdichtungssystem komplett in einem Versuchsstand aufgebaut. Auf diese Weise lassen sich die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Systems erfassen.

Bei Versuchen nach der ersten Art (Indexversuchen) ist es unbedingt erforderlich, die Wirkungsweise der Schutzlage genau zu kennen. Die Versuchsdurchführung ist so anzulegen, daß sich die für die Wirkung verantwortlichen Effekte aus den Ergebnissen möglichst eindeutig herauslesen lassen. Die Resultate sind ansonsten als Größen zu verstehen, die über den reinen Zahlenwert zwar eine Unterscheidung einzelner Proben erlauben, eine Aussage in bezug auf eine tatsächlich erreichbare Schutzwirkung jedoch nicht ermöglichen.

Eine eindeutige Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Situation in der Deponie ist nur dann sichergestellt, wenn die Bedeutung sämtlicher Einflußgrößen auf die in einem stark vereinfachten Versuch produzierten Resultate bekannt ist. Als Einflußgrößen, die bei dem hier behandelten Problem starken Schwankungen unterliegen, sind besonders zu nennen:

- Form des Drainagekieses (kritisches Korn)
- Anordnung der Einzelkörner (Belastungsbild)
- Belastung der Einzelkörner
- Verhalten des Untergrundes

Nach dem gegenwärtigen Stand des Wissens ist weder der genaue Wirkungsmechanismus einer geotextilen Schutzlage bekannt und berechenbar, noch lassen sich die Einflüsse aus den anderen Komponenten des Dichtungssystems quantifizieren. Als sicherste und der Wirklichkeit am nahekomensten Nachweismethoden sind daher zur Zeit noch Versuche anzusehen, bei denen ein Ausschnitt des Dichtungssystems im Maßstab 1 : 1 nachgebildet wird.

Bei dieser zweiten Form der Versuche kann die mit einer geotextilen Schutzlage zu erreichende Schutzwirkung unter den zu erwartenden tatsächlichen Bedingungen unmittelbar an dem zu schützenden Element festgestellt werden. Die Einflüsse und das Zusammenwirken einzelner Parameter wirken sich direkt auf die nach der Belastung festzustellenden, durch die Wirkung der Schutzlage im Versuch mitverursachten Veränderungen (Verformungen, Beschädigungen) der Kunststoffdichtungsbahn aus.

Die Ergebnisse solcher Versuche können im weiteren Verlauf, durch die Beobachtung von Effekten aus der systematischen Veränderung einzelner Einflußparameter, bei der Entwicklung einfacherer Tests dazu dienen, die aus den stark abstrahierenden Versuchen gewonnenen Werte einzuordnen und in ihrer Aussagekraft abzusichern.

Inwieweit die realitätsnahen Modellversuche unmittelbar übertragbare Ergebnisse liefern können, hängt stark von der Auslegung der Apparaturen und von der Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung ab. Störungen oder Verfälschungen der Ergebnisse können besonders aufgrund folgender Ursachen auftreten:

- Störende Randeinflüsse wegen zu kleiner Apparaturen
(Verspannungen im Kies,
Aufhängen des mineralischen Untergrundes an den Wandungen)
- Wahl des Untergrundes (mineralisch oder künstlich)
- Geschwindigkeit der Lastaufbringung (Porenwasserüberdruck)

Neben diesen unmittelbar ersichtlichen Verfälschungsmöglichkeiten ergeben sich sowohl bei den vereinfachten Versuchen als auch besonders bei den gewollt realitätsnahen 1 : 1 Versuchen noch weitere Unsicherheiten, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Als solche sind vor allem zu nennen:

- Versuchstemperatur
- Zeitdauer der Belastung

Beide Arten von Versuchen liefern als feststellbare Resultate Verformungen (Deformation oder Perforation) der Kunststoffdichtungsbahn, die interpretiert werden müssen. Darüber, welche Größenordnung der in den Versuchen hervorgerufenen Dehnungen als noch vertretbar angesehen werden kann, gehen die Meinungen bei den mit den Prüfungen von geotextilen Schutzlagen und Kunststoffdichtungsbahnen befaßten Gutachtern derzeit noch auseinander.

3.5.2 Zulässige Beanspruchung einer PEHD-Kunststoffdichtungsbahn, nach KOCH et al., [18]

Unmittelbare Beschädigungen oder gar Perforationen der Dichtungsbahnen sind aus leicht ersichtlichen Gründen in jedem Fall zu vermeiden. Darüber, welche Dehnungen eine Kunststoffdichtungsbahn allerdings ohne Verlust der Funktionsfähigkeit bei Ansatz der normal zu erwartenden Lebensdauer ertragen kann, sind derzeit noch keine Aussagen zu erhalten. Selbst nur die Abschätzung der Lebensdauer einer Kunststoffdichtungsbahn aus PEHD, ohne den möglicherweise schädigenden Einfluß der punktförmigen Belastung, bereitet erhebliche Schwierigkeiten. Laut [18] kann unter derartigen Bedingungen bei einer Temperatur von 25°C eine unverminderte Funktionstüchtigkeit über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren erwartet werden.

Solche Abschätzungen der Lebensdauer werden aus Zeitstandsversuchen an Rohren aus PEHD abgeleitet (s. [18]). Bei diesen Versuchen werden Rohre in verschiedenen temperierten Wasserbädern unter einem konstanten Innendruck gehalten. Die Zeit bis zum Versagen (Standzeit) wird festgehalten. Sie ist temperatur- und druckabhängig. In Bild 17 sind beispielhaft die Zeitstandfestigkeiten von Rohren aus dem Werkstoff HOSTALEN GM 5010 T2 wiedergegeben. Bei diesem Diagramm wurden nach der Extrapolationsmethode nach ARRHENIUS die bei 60 und 80°C ermittelten Standzeiten auf die bei Temperaturen von 40 und 20°C zu erwartenden extrapoliert (gestrichelte Linien).

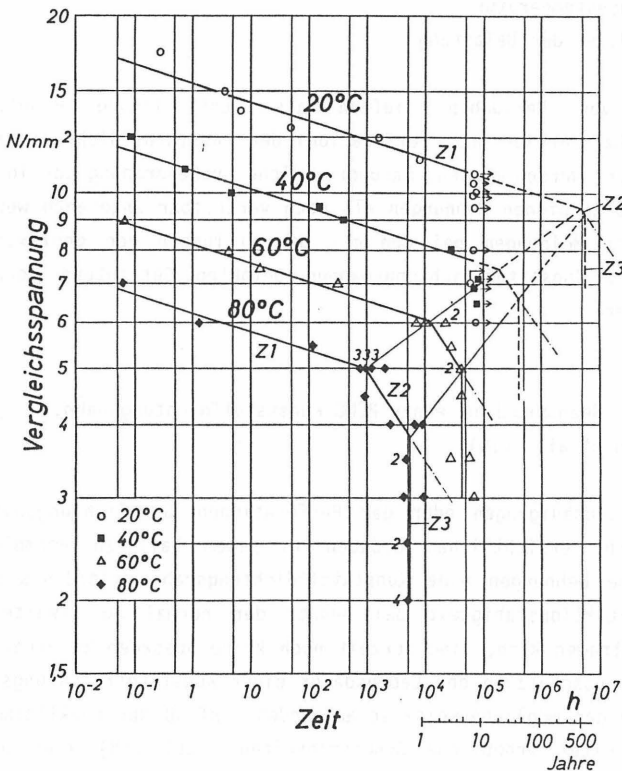


Bild 17: Zeitstandfestigkeit von Rohren aus HOSTALEN GM 5010 T2, aus [18]

Die Kurven bestehen jeweils aus drei Teilen. Der mit Z1 bezeichnete erste Teil erfaßt den Bereich mit einer hohen Bruchdehnung und plastischen Verformungen. In dem Bereich nach dem ersten Knick - mit Z2 bezeichnet - stellen sich Brüche mit geringeren Dehnungen ohne plastische Verformungen ein. Die Ursache dafür ist physikalischer Natur und nicht auf chemische Veränderungen des Materials zurückzuführen. Der dritte, mit Z3 bezeichnete Teil, charakterisiert die Alterung des Materials. Der Knickpunkt am Übergang von Z2 zu Z3 zeigt den Beginn der oxidativen Schädigung durch den im Wasser gelösten Sauerstoff. Bei einer Prüfung mit sauerstofffreiem Wasser würde dieser Knick nicht auftreten, was in der Darstellung (Bild 17) durch die strichpunktiert weitergeführten Linien angedeutet ist.

Die Zeitstandfestigkeit von Dichtungsbahnen läßt sich nicht unmittelbar aus den an Rohren gleichen Materials gewonnenen Kurven ermitteln. Kunststoffdichtungsbahnen werden zum einen zweiachsig, zum Teil mit gleichen Spannungen in beiden Richtungen, beansprucht, zum anderen unterliegen sie, als wesentlicher Unterschied, nicht dauerhaft einer konstanten Zugspannung.

Je nach den Untergrundverhältnissen wird die Dichtungsbahn infolge von Setzungen bis auf einen maximalen Betrag gedehnt. Die Spannungen, welche durch diese Dehnungen in der Dichtungsbahn erzeugt werden, nehmen infolge Relaxation im Laufe der Zeit ab. Dieser Vorgang beginnt sofort mit dem Auftreten der ersten Dehnungen. In Bild 18 ist das Relaxationsverhalten des aus dem Rohrmaterial GM 5010 T2 (s. Bild 17) weiterentwickelten Deponiebahnmateri als HOSTALEN GM 5040 T12 dargestellt. Die Materialproben wurden zur Aufnahme der Relaxationskurven bei 20°C und einer Abzugsgeschwindigkeit von 50 mm/min einachsig auf 1, 2, 4 und 6 % gedehnt. Diese Dehnungen wurden konstant gehalten und der Spannungsabfall (Relaxation) registriert.

Die Kurven a, b und c (Dehnung 2 %) spiegeln den Effekt unterschiedlicher Abzugsgeschwindigkeiten - a => 50 mm/min, b => 5 mm/min, c => 0,5 mm/min - wider. Während der Dehnung der Proben findet bereits eine Spannungsrelaxation statt, die um so stärker ist, je langsamer die Dehnung aufgebracht wird. Bei gleicher konstant gehaltener Dehnung münden

allerdings alle Kurven im Laufe der Zeit in ein und dieselbe Relaxationskurve.

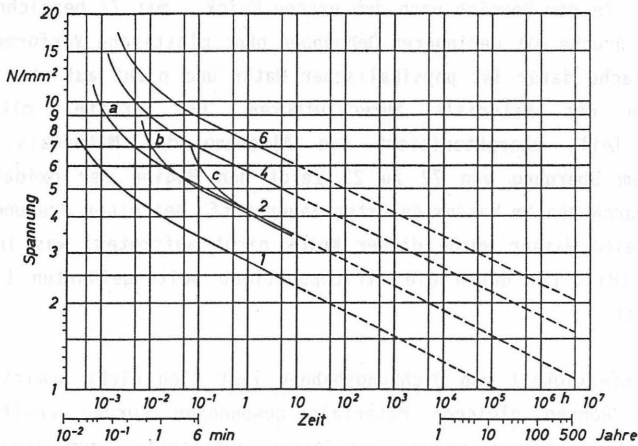


Bild 18: Spannungsrelaxation von HOSTALEN GM 5040 T12, aus [18]
 einachsige Dehnungen 1 - 6 %, 20°C,
 a, b, c: Abzugsgeschwindigkeiten 50, 5, 0,5 mm/min

Überträgt man die Relaxationskurven in das Zeitstanddiagramm, so erhält man eine Darstellung, der die zu erwartende Lebensdauer einer Kunststoffdichtungsbahn, welche um ein bestimmtes Maß gedehnt ist, entnommen werden kann. Die einachsigen bestimmten Relaxationskurven sind dazu auf zweiachsige Zugbeanspruchung umzurechnen. Laut [18] können dazu die in der Tabelle 4 angegebenen, experimentell ermittelten Umrechnungsfaktoren verwendet werden. Bild 19 zeigt die bereits umgerechneten Relaxationskurven im Zeitstanddiagramm für HOSTALEN GM 5040 T12.

Dehnung [%]	Beanspruchung in Wasser und Wasser und Netzmittel
1	1,35
2	1,3
4	1,2
6	1,1

Tabelle 4: Umrechnungsfaktoren für die Relaxationskurven
 von ein- auf zweiachsige Zugbeanspruchung, s. [18]

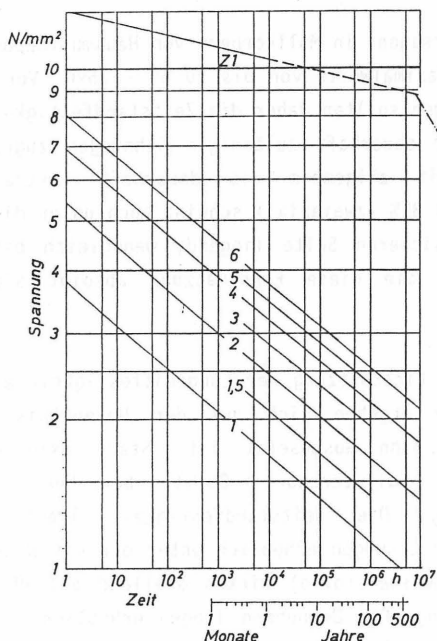


Bild 19: Zeitstanddiagramm für HOSTALEN GM 5040 T12
mit Relaxationskurven, s. [18]
Zeitstandfestigkeit mit Wasser, 20°C,
1 - 6: Spannungsrelaxation

Der Darstellung Bild 19 kann entnommen werden, daß eine hier beispielhaft betrachtete Kunststoffdichtungsbahn aus GM 5040 T12 selbst bei einer Dehnung von 6 % in die Alterung hinein kommt, d.h. durch die eingetragenen zweiachialen Dehnungen nicht vorzeitig versagt. Laut [18] sollten größere Dehnungen als 4 % nicht zugelassen werden, um Reserven für unvorhergesehene zusätzliche Dehnungen zu behalten. In dieser Einschätzung wird allerdings schon der schwächste Bereich der Kunststoffdichtung, die Schweißnaht, berücksichtigt.

Nach Ansicht des Verfassers sind bei solchen Langzeitbetrachtungen in jedem Fall die Zeitstandkurven für höhere Temperaturen als 20°C heranzuziehen. Messungen an ablaufendem Sickerwasser haben Temperaturen von ca. 30 - 35°C ergeben. Welche Temperaturen an einer Deponiebasis im Einzelfall tatsächlich herrschen können, hängt von vielen Faktoren ab und

läßt sich nicht generell vorhersagen. In Müllkörpern von Hausmülldeponien zeigten Messungen vereinzelt Maximalwerte von bis zu 60 - 65°C. Vor dem Hintergrund solcher Beobachtungen sollten daher die Zeitstandfestigkeiten unter 60°C zur Bestimmung der dauerhaft zulässigen Dehnungen zugrunde gelegt werden. Die zur Zeit allgemein als dauerhaft vertretbar angenommene Dehnung von maximal 3 % (zweiachial) scheint auch unter diesen Voraussetzungen als auf der sicheren Seite liegend, wenngleich bisher noch keine Kurven vorliegen, die diese Einschätzung absolut sicher belegen.

Weitere Unsicherheiten bei der Einschätzung der Langzeitfestigkeit einer Dichtungsbahn in der Deponie ergeben sich aus der Unkenntnis des chemischen Milieus, dem die Bahn ausgesetzt ist. Stark oxidierend wirkende Substanzen (z.B. Salpetersäure > 25 %) bewirken eine Verminderung der Reißdehnung. Die Zeitstandfestigkeit liegt bei Verwendung derartiger wässriger Lösungen erheblich unter der mit Wasser. Organische Stoffe (z.B. Kohlenwasserstoffe) wirken quellend auf PE und verringern so die Streckspannung. Die Dehnungen liegen erheblich höher, die Zeitstandkurven liegen jedoch ebenfalls unter denen aus Versuchen mit Wasser (s. [18]).

Die bisher vorgestellten Betrachtungen gehen davon aus, daß eine Dichtungsbahn ein- oder zweiachial gedehnt wird. Die Beanspruchung, zu deren Abminderung eine Schutzlage eingesetzt wird, bewirken aber nicht nur Zugspannungen, bzw. Dehnungen, sondern bedeuten für die Dichtungsbahnen Druckspannungen senkrecht zur Ausbreitungsebene der Flächenelemente und verursachen örtlich meßbare Dickenänderungen. Diese punktuellen Beanspruchungen sollen durch geotextile Schutzlagen auf ein unschädliches Maß abgemindert werden. Wo für diese Art der Beanspruchung die einer Dichtungsbahn maximal zumutbare Grenze liegt, ist bisher noch völlig offen.

Zu diesem Zeitpunkt sei angemerkt, daß die materialspezifischen Eigenschaften der Kunststoffdichtungsbahnen, die eine Formulierung von zulässigen Grenzwerten so erschweren, auch bei der Einschätzung geotextiler Schutzlagen aus PEHD - oder auch sinngemäß für solche aus PP - zu berücksichtigen sind.

Eine Schutzlage ist sinnvollerweise so auszulegen, daß sie in der Lage ist, ihre Funktion mindestens so lange sicher aufrecht zu erhalten, wie das geschützte Element imstande ist, einwandfrei seine Aufgabe zu erfüllen. Die vielfältigen Aspekte, die zu einer in jeder Hinsicht sicheren Dimensionierung zu berücksichtigen wären, können und sollen mit dieser Arbeit nicht vertieft werden. In den folgenden Kapiteln wird nur darauf eingegangen, ein zur Zeit gängiges Nachweisverfahren im Hinblick auf die Aussagefähigkeit des Versuches auszuleuchten. Der momentan geltende Grenzwert wird dabei als Maßstab bei der Beurteilung des Versuches und der Auswertmöglichkeiten einbezogen. Die Frage, ob das Verfahren oder der anzusetzende Grenzwert für eine sichere Beurteilung des Langzeitverhaltens des gesamten Systems ausreichend ist, kann nur am Rande behandelt werden.

4. Vorversuche

4.1 Kleinräumige Lastverteilung (Pufferwirkung), aus [19]

Zur Bestimmung der kleinräumigen Lastverteilung durch ein Geotextil unter einer punktförmigen Auflast und zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Materialparameter auf die Lastabtragung wurde mit verschiedenen Verbundstoffen ein einfacher Versuch durchgeführt: Die Geotextilien wurden auf eine Stahlplatte gelegt. Zwischen Stahlplatte und Prüfling wurde ein Millimeterpapier unter einem Durchschlagpapier angeordnet. Eine auf dem Verbundstoff platzierte Kugel wurde daraufhin über einen Zeitraum von einer Minute belastet, so daß sich eine entsprechend beanspruchte Fläche durch das Kohlepapier auf dem Millimeterpapier abzeichnete. Die Höhe der Belastung war so gewählt, daß sich in der beschriebenen Versuchsdurchführung gut ablesbare Abbildungen ergaben. In den folgenden Bildern 20.1 bis 20.6 sind die so sichtbar gemachten Belastungsflächen wiedergegeben.

Es wurden zwei von den Flächengewichten her gleiche Serien von Verbundstoffen untersucht. Eine Produktgruppe war aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD), die andere aus Polypropylen (PP) gefertigt. Die untersuchten Verbundstoffe unterschieden sich – bei einem durchgehend gleichbleibenden Gewebegewicht von 335 g/m^2 – innerhalb einer Gruppe lediglich hinsichtlich des Flächengewichtes der verwendeten Vliese (400 g/m^2 , 600 g/m^2 , 900 g/m^2).

Die Ergebnisse aus diesem Versuch zeigen, daß sowohl für Schutzlagen (hier: Verbundstoffe) aus PEHD als auch für solche aus PP deutlich eine Zunahme der erzielbaren Lastausbreitung mit Zunahme des Flächengewichtes des Vlieses zu verzeichnen ist. Der Vergleich zwischen den sich entsprechenden Verbundstoffen aus den beiden berücksichtigten unterschiedlichen Materialien belegt, daß der PP-Verbundstoff beinahe durchgehend eine geringfügig bessere Lastverteilung aufweist als das vergleichbare Produkt aus PEHD.

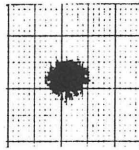
Rohmaterial:

PEHD

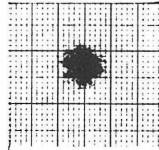
PP

Bild 20.1:

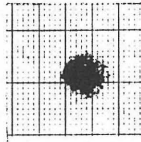
Gewebe 335 g/m²
 Vlies 400 g/m²
 65 mm²

**Bild 20.2:**

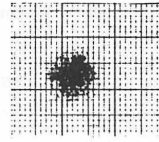
Gewebe 335 g/m²
 Vlies 400 g/m²
 67 mm²

**Bild 20.3:**

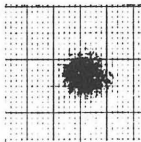
Gewebe 335 g/m²
 Vlies 600 g/m²
 83 mm²

**Bild 20.4:**

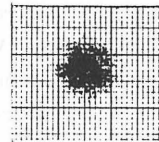
Gewebe 335 g/m²
 Vlies 600 g/m²
 86 mm²

**Bild 20.5:**

Gewebe 335 g/m²
 Vlies 900 g/m²
 95 mm²

**Bild 20.6:**

Gewebe 335 g/m²
 Vlies 900 g/m²
 101 mm²



Der Unterschied im mechanischen Verhalten, der sich zwischen einem Vliesstoff aus PEHD und einem PP-Vlies in diesen Ergebnissen ausdrückt, rührt zum einen daher, daß ein materialbedingt unterschiedliches Elastizitätsverhalten vorliegt. Zum anderen ist produktionsbedingt eine Faser aus PP einfacher und intensiver zu kräuseln und zeichnet sich dadurch durch eine größere Sprungkraft aus als eine Faser aus PEHD. Diese Eigenschaft der Einzelfilamente wirkt sich ebenfalls positiv auf das lastverteilende Verhalten des aus PP-Fasern gewirkten Produktes aus.

Neben den produktbedingten Unterschieden zeigen die oben dargestellten Versuchsergebnisse weiter, daß eine gleichmäßige, flächenhafte, wenn auch nur sehr kleinräumige Lastverteilung unter einer reinen Geotextillage – selbst mit den Produkten der für diese Versuche verwendeten vergleichsweise niedrigen Gewichtsklassen – erreicht wird. Die Pufferwirkung kann allerdings nur dazu dienen, Druckspitzen unmittelbar unter scharfkantigen Einzelkörnern durch die kleinräumige Lastverteilung auf ein unschädliches Maß zu reduzieren. Eine wirklich flächenhafte

Lastverteilung, mit einem einer Sandschicht vergleichbaren Ausbreitungswinkel θ (bei Böden ca. $\theta \approx 45 + \varphi/2$) ist mit den derzeitigen geotextilen Schutzlagen nicht erreichbar.

4.2 Großräumige Lastverteilung

4.2.1 Allgemeines

Für erste Vorversuche zur Untersuchung der Schutzwirkung von Geotextilien wurde am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig ein Versuchsstand eingerichtet, mit dem in sechs einzelnen Ständen ab Ende 1988 erste Versuchsreihen zu dieser Thematik durchgeführt wurden. Um die Situation an einer Deponiebasis mit möglichst geringem Aufwand so weit wie möglich nachbilden zu können, wurden spezielle Töpfe zum Einbau in die Belastungseinrichtung des laboreigenen Kompressionsgerätes gefertigt. In diesen Töpfen sollte das Verhalten eines Ausschnittes eines Abdichtungssystems mit mineralischer Dichtung, Kunststoffdichtungsbahn, Schutzlage und Kies unter Last beobachtet werden können.

Eine der aus runden Töpfen mit Durchmessern von ca. 130 mm bestehenden, mit bis zu $1,5 \text{ MN/m}^2$ beaufschlagbaren Einheiten ist mit Angaben zu der Anordnung der einzelnen Lagen ist in dieser Arbeit bereits in Bild 12 dargestellt.

Erste Versuche mit als Untergrund verwendeten Ersatzmaterialien, statt des aufwendig einzubauenden bindigen Bodens als unterste Schicht, führten zu keinem befriedigenden Ergebnis. Wie den in Bild 21 dargestellten Last-Verformungskurven zu entnehmen ist, war bei Belastungen von etwa 200 kN/m^2 ein Zusammenbrechen der Strukturen der versuchsweise eingesetzten Preßpappe bzw. des Styrodurs festzustellen. Zum Vergleich sind in diesem Diagramm entsprechende Versuchsergebnisse eines nichtbindigen Bodens (Boden 1) und zweier bindiger Böden (Boden 2: Schluff; Boden 3: Ton) mit eingezeichnet. Im Verlauf weiterer Versuchsreihen in den kleinen Drucktöpfen wurden aufgrund dieser Ergebnisse nur natürliche Böden als Untergrundmaterial verwendet.

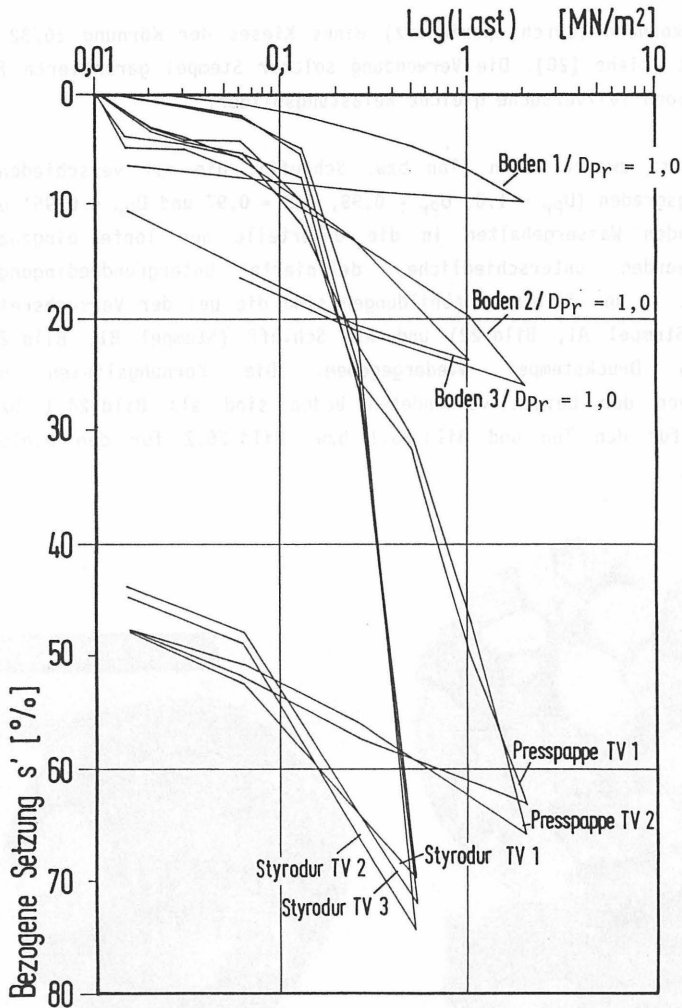


Bild 21: Last-Verformungskurven

4.2.2 Untersuchungen zum Einfluß des Wassergehaltes des Untergrundes

Um in vergleichenden Untersuchungen die Schutzwirkung von Geotextilien und deren Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt des mineralischen Untergrundes beurteilen zu können, wurden Druckstempel durch Fixierung

von Einzelkörnern (durch Epoxidharz) eines Kiesel der Körnung 16/32 mm hergestellt, siehe [20]. Die Verwendung solcher Stempel garantierte für die jeweiligen Teilversuche gleiche Belastungsbilder.

Durch Einsatz zweier Böden (Ton bzw. Schluff), die mit verschiedenen Verdichtungsgraden ($D_{Pr} = 1,0$, $D_{Pr} = 0,99$, $D_{Pr} = 0,97$ und $D_{Pr} = 0,95$) und entsprechenden Wassergehalten in die Unterteile der Töpfe eingebaut wurden, wurden unterschiedliche, definierte Untergrundbedingungen geschaffen. In den folgenden Abbildungen sind die bei der Versuchsreihe mit Ton (Stempel A1, Bild 22) und mit Schluff (Stempel B1, Bild 23) verwendeten Druckstempel wiedergegeben. Die Körnungslinien und Proctorkurven der beiden verwendeten Böden sind als Bild 24.1 bzw. Bild 24.2 für den Ton und Bild 25.1 bzw. Bild 25.2 für den Schluff dargestellt.

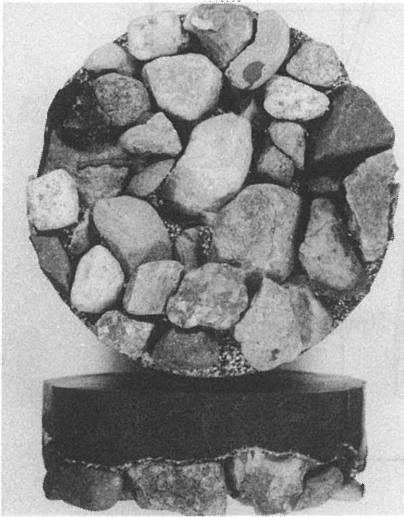


Bild 22: Druckstempel A1
Draufsicht und Ansicht

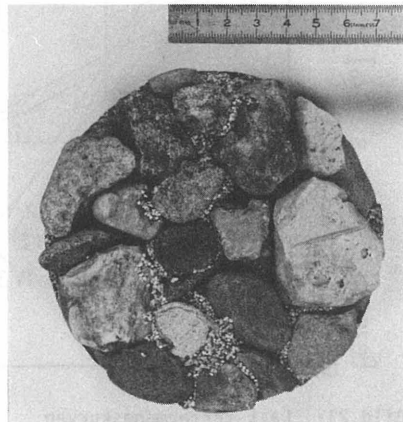


Bild 23: Druckstempel B1
Draufsicht

Die Versuche wurden alle mit einer PEHD-Dichtungsbahn $d_{KDB} = 2 \text{ mm}$ gefahren. Als Prüflast wurde die einer Spannung von $1,2 \text{ MN/m}^2$ entsprechende Belastung eingestellt. Eine Versuchsserie wurde unter Variation der oben erwähnten Einbauwassergehalte ohne geotextile

Schutzlage, eine zweite mit einem auf der Dichtungsbahn eingelegten PEHD-Verbundstoff, einem Vlies 1200 g/m² mit Gewebe, durchgeführt.

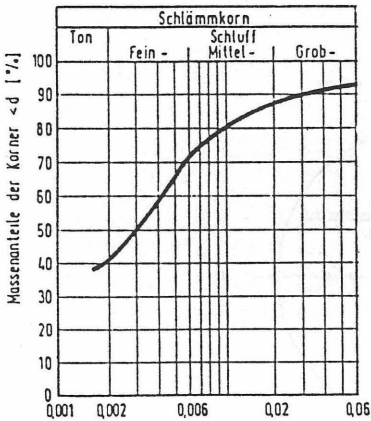


Bild 24.1: Körnungslinie Ton
T = 41,5 %, U = 51,9 %

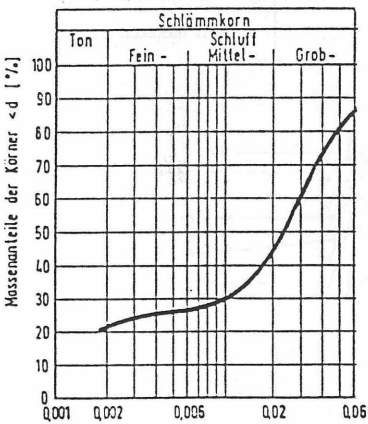


Bild 25.1: Körnungslinie Schluff
T = 21,8 %, U = 64,8 %

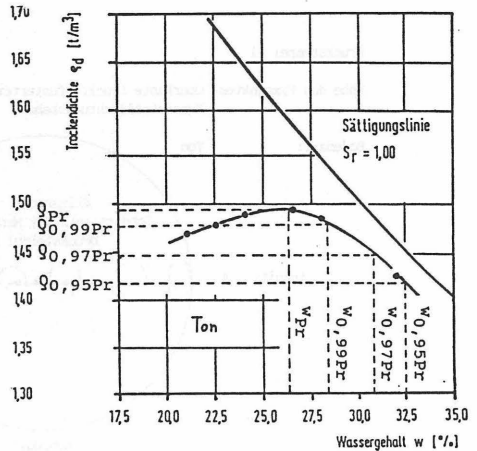


Bild 24.2: Proctorkurve Ton

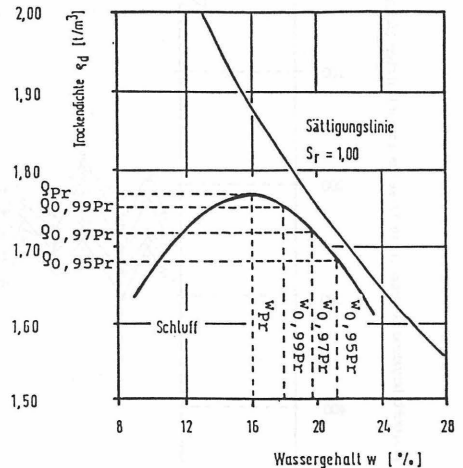


Bild 25.2: Proctorkurve Schluff

Durch Vermessen der verformten Dichtungsbahn nach den Versuchen in den - bezogen auf die Positionierung des Druckstempels - immer gleichen Achsen, war eine Aussage zu den Auswirkungen des unterschiedlichen Untergrundes

möglich. Die Bilder 26.1 (für Ton) und 26.2 (für Schluff) geben die festgestellten Verformungen wieder.

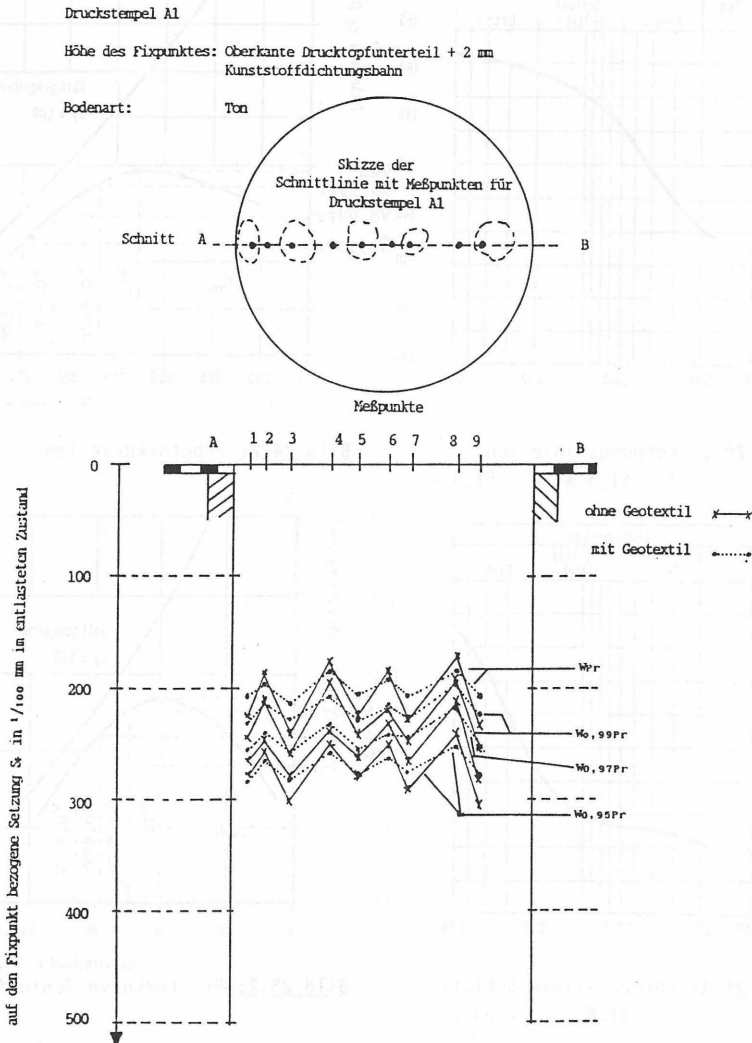


Bild 26.1: Oberflächenverformungen, Untergrund Ton

Druckstempel B1

Höhe des Fixpunktes: Oberkante Drucktopfunterteil + 2 mm
Kunststoffdichtungsbahn

Bodenart: Schluff

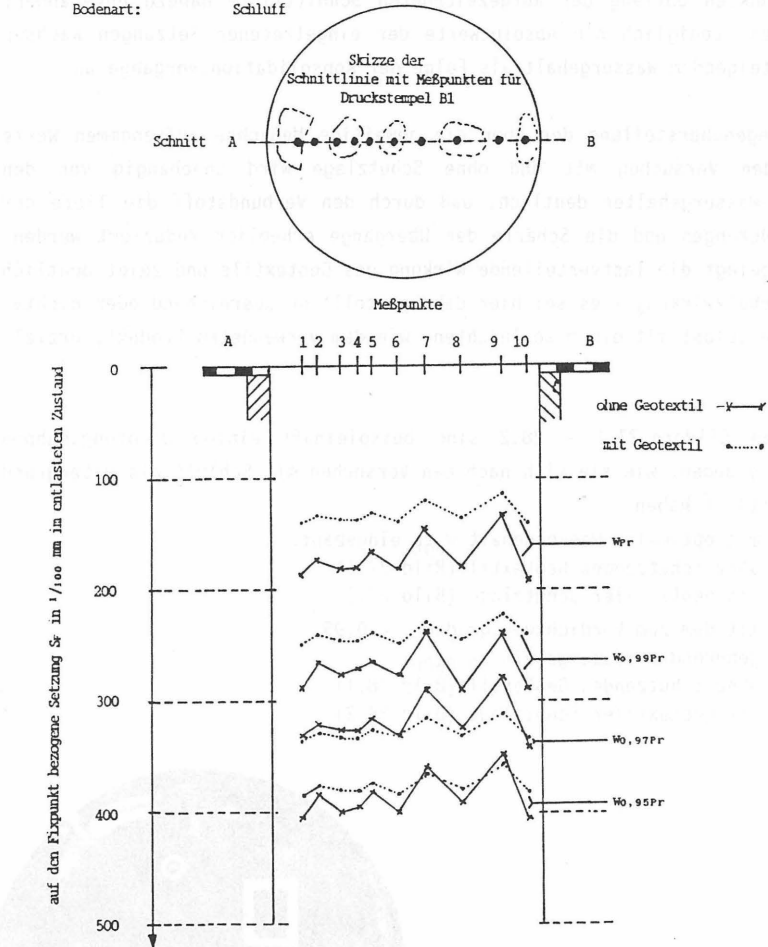


Bild 26.2: Oberflächenverformungen, Untergrund Schluff

Als ein Ergebnis der beschriebenen Versuchsreihe läßt sich feststellen, daß ein eindeutig messbarer Einfluß des Einbauwassergehaltes auf die Beanspruchung der Dichtungsbahn und die Wirkung der geotextilen Schutzlage weder für die Verwendung von Schluff noch von Ton als

Untergrund festgestellt werden konnte. Die aufgenommenen Meßwerte zeigen, daß trotz zunehmendem Wassergehalt die Differenzen zwischen Tief- und Hochpunkten entlang der aufgezeichneten Schnittlinie nahezu unverändert bleiben. Lediglich die Absolutwerte der eingetretenen Setzungen wachsen mit steigendem Wassergehalt als Folge der Konsolidationsvorgänge an.

Bei Gegenüberstellung der über die jeweilige Meßachse aufgenommenen Werte aus den Versuchen mit und ohne Schutzlage wird unabhängig von den Einbauwassergehalten deutlich, daß durch den Verbundstoff die Tiefe der Eindrücke und die Schärfe der Übergänge erheblich reduziert werden. Dies belegt die lastverteilende Wirkung des Geotextils und zeigt deutlich die Schutzwirkung – es sei hier dahingestellt ob ausreichend oder nicht-, welche selbst mit einem so leichten, wie dem verwendeten Produkt, erzielt wird.

In den Bildern 27.1 – 28.2 sind beispielhaft einige Dichtungsbahnen wiedergegeben, wie sie sich nach den Versuchen mit Schluff als Untergrund dargestellt haben:

- ==> mit optimalen Wassergehalt w_{opt} eingebaut,
ohne schützendes Geotextil (Bild 27.1)
mit geotextiler Schutzlage (Bild 27.2)
- ==> mit dem zum Verdichtungsgrad $D_{pr} = 0,95$
gehörenden Wassergehalt $w_{0,95pr}$
ohne schützendes Geotextil (Bild 28.1)
mit geotextiler Schutzlage (Bild 28.2)



Bild 27.1:

Dichtungsbahn ohne
geotextile Schutzlage

Untergrund: Schluff, Einbauwassergehalt w_{pr}

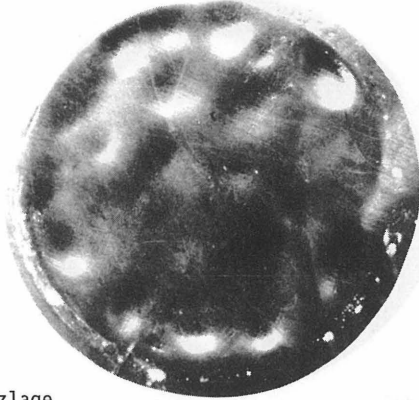


Bild 27.2:

Dichtungsbahn mit
geotextiler Schutzlage

Untergrund: Schluff, Einbauwassergehalt w_{Pr}

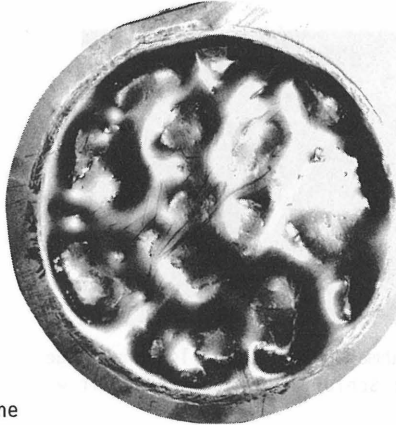


Bild 28.1:

Dichtungsbahn ohne
geotextile Schutzlage

Untergrund: Schluff, Einbauwassergehalt $w_{0,95Pr}$

Die im Bild 27.1 weiß umrandete rechteckige Fläche ist im Bild 29.1 als Detailaufnahme wiedergegeben. Auf der gesamten Fläche der in dem Versuch verwendeten Dichtungsbahnprobe sind direkte Beschädigungen der Oberfläche erkennbar, wie sie in Bild 29.1 festgehalten sind. Die mit einer geotextilen Schutzlage erreichbare diesbezügliche Verbesserung ist aus der Detailaufnahme Bild 29.2 ersichtlich, welche von der entsprechenden Stelle der im Bild 27.2 wiedergegebenen Probe aufgenommen wurde. Eine oberflächliche Beschädigung der Kunststoffdichtungsbahn ist an dieser geschützten Probe an keiner Stelle auszumachen.

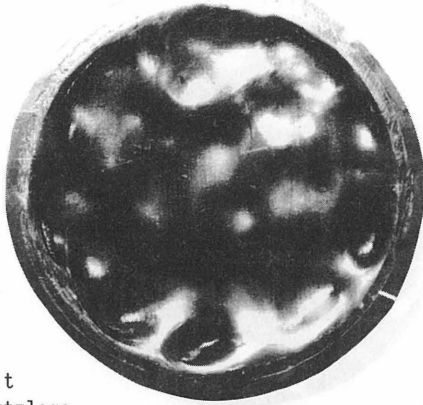


Bild 28.2:

Dichtungsbahn mit
geotextiler Schutzlage

Untergrund: Schluff, Einbauwassergehalt $w_{0,95Pr}$

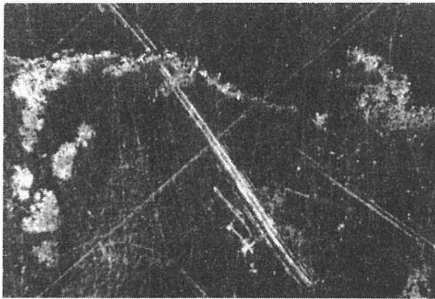


Bild 29.1: Detailaufnahme, ohne geotextile Schutzlage

Untergrund: Schluff, Einbauwassergehalt w_{Pr}

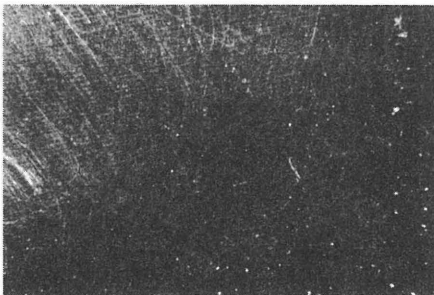


Bild 29.2: Detailaufnahme, mit geotextiler Schutzlage

Untergrund: Schluff, Einbauwassergehalt w_{Pr}

4.2.3 Konsequenzen für weitere Versuche

Die Ergebnisse der in den kleinen Drucktöpfen (ϕ 120 - 130 mm) durchgeführten Versuchsreihen zeigen, daß - unabhängig von der Art des Untergrundes - eine realitätsnahe Belastung der Schutzlage samt Dichtungsbahn nicht möglich ist. Wegen der geringen Abmessungen der Einrichtung führen bei einem lose eingeschütteten Kies unvermeidbare Verspannungen zu Randeinflüssen, welche die Situation in einem nicht definierbaren Ausmaß verfälschen. Die Vielfalt möglicher Kornformen und -anordnungen kann bei einem lose eingeschütteten Kies üblicher Körnung (16/32) wegen der zu geringen Topfabmessungen nicht annähernd erfaßt werden, was jedoch erforderlich ist, um den gesuchten schlimmsten Fall (worst case) abzuprüfen. SCHRÖDER hält aufgrund statistischer Betrachtungen eine Fläche von $A \geq 0,6 \text{ m}^2$ für erforderlich, [21]. Eine Verwendung von festen (in ihrer Form manipulierbaren) Druckstempeln verbessert die Möglichkeiten nur sehr bedingt, da die freie Beweglichkeit der einzelnen Kieskörner nicht mehr gegeben ist. Die Lastabtragung erfolgt statt über ein sich unter der jeweiligen Last einregelndes Korngerüst über fest blockierte Brücken. Ein Ausgleich innerhalb des Korngefüges ist damit nicht mehr möglich. Die Auswirkungen zeigen die in den vorstehenden Bildern 26.1 und 26.2 dargestellten Oberflächenverformungen.

Die nach der Belastung - ob mit oder ohne Schutzlagen - festgestellten Verformungen zeigen zwangsläufig immer dasselbe Relief, welches durch die festen Druckstempel erzwungen wird. Die möglichen Auswirkungen der aufgrund verschiedener Wassergehalte im mechanischen Verhalten veränderten, als Untergrund eingesetzten Böden können sich bei der aufgebrachten Belastung nicht einstellen, da eine Wechselwirkung zwischen Kies und Boden ausgeschlossen ist.

Für weitere Versuche ergaben sich aus diesen Erfahrungen die folgenden Rückschlüsse:

==> Die Abmessungen der Prüfeinrichtungen müssen zur Nachbildung realistischer Verhältnisse gegenüber den verwendeten Töpfen (ϕ 120 - 130 mm) erheblich vergrößert werden.

- ==> Für möglichst realitätsnahe Versuche ist der Drainagekies lose einzuschütten.
- ==> Der infolge von Verspannungen im Kies über die Wandungen abgetragene Teil der Prüflast ist durch eine entsprechende Lastüberhöhung zu kompensieren.
- ==> Feste Druckstempel können nur bei vergleichenden Untersuchungen eingesetzt werden, nicht jedoch um die zu erwartende Größenordnung möglicher Verformungen festzustellen.

5. Versuche im Drucktopf ϕ 300 mm

5.1 Allgemeines

Aus den vorgenannten Überlegungen wurde vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem ebenfalls auf dem Gebiet der Geotextilprüfungen tätigen Büro Dr. Knipschild, Seevetal, eine Prüfeinrichtung erstellt, die einerseits aufgrund der Größe noch handhabbar ist, andererseits aber auch reliitätsnahe Ergebnisse erwarten läßt.

Diese Einrichtung wird für weitergehende, systematische Untersuchungen und für projektbezogene Eignungsprüfungen von geotextilen Schutzlagen eingesetzt. Die Anlage besteht im wesentlichen aus Töpfen mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Belastungseinrichtung. Es stehen drei dieser Töpfe zur Verfügung. Mit der hydraulisch arbeitenden Belastungseinrichtung können Lasten aufgebracht werden, die auf die Grundfläche von $A_{\text{Topf}} \approx 0,07 \text{ m}^2$ bezogen, einer Spannung von bis zu $1,5 \text{ MN/m}^2$ entsprechen. In Bild 30 ist die Versuchseinrichtung dargestellt.

Die Anlage entspricht in Abmessungen und Möglichkeiten den Richtlinien der BAM, welche nicht zuletzt aufgrund von Ergebnissen entstanden sind, die zum Teil auch am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig in Versuchsreihen mit diesen Drucktöpfen erarbeitet worden sind.

5.2 Versuchsdurchführung

In dem Drucktopf wird ein Ausschnitt des Deponieabdichtungssystems nachgebaut. Dichtungsbahn und das zu prüfende Geotextil werden, entsprechend zugeschnitten, frei auf den zuvor unter Kontrolle der Einbauwerte eingebauten Boden oder die Elastomer-Unterlage gelegt. Über der Schutzlage wird der Drainagekies in einer Dicke von vereinbarungsgemäß 20 cm als lose Schüttung eingebracht. Darüber wird eine ca. 5 cm dicke Sandschicht angeordnet, auf welche die Druckplatte mit dem Ansatzpunkt

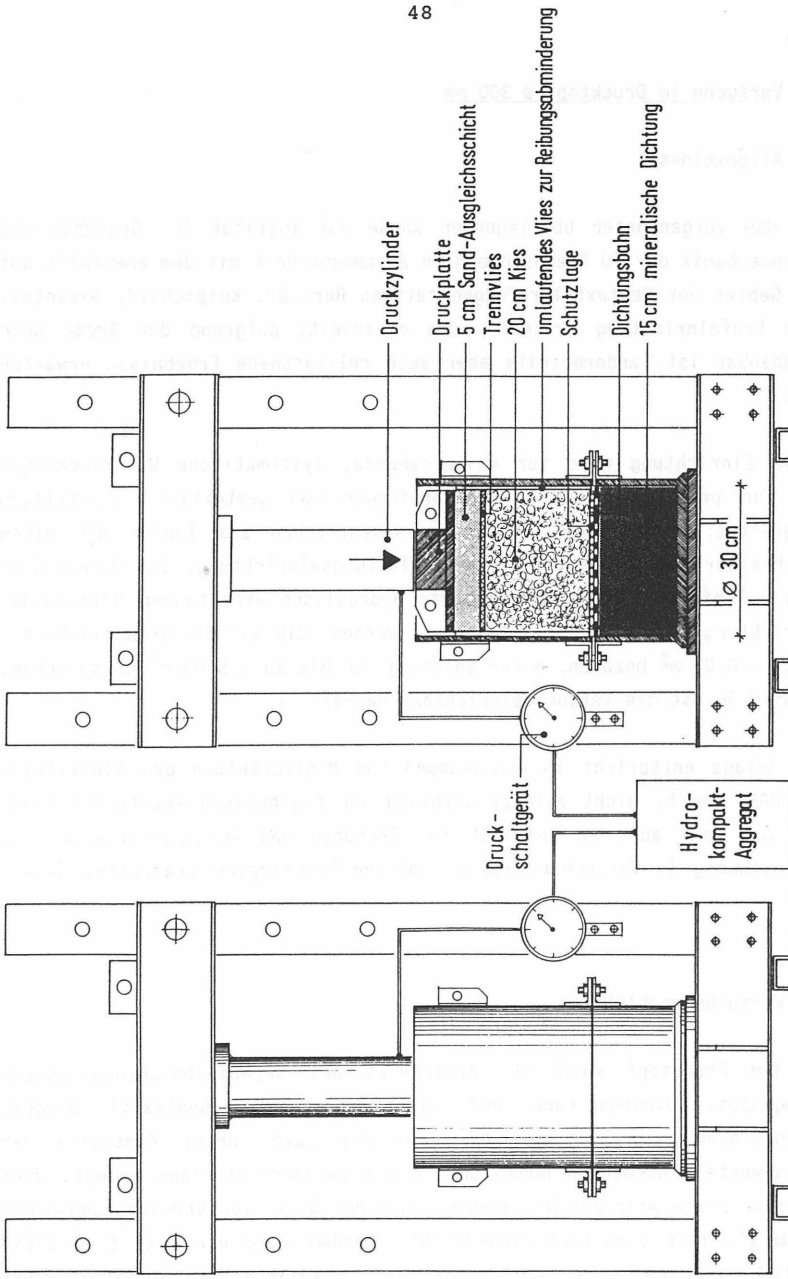


Bild 30: Prüfeinrichtung mit Drucktöpfen $\varnothing 300$ mm, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig

für den Druckzylinder plaziert wird. Die Anordnung der einzelnen Schichten kann der Darstellung Bild 30 entnommen werden.

Die obere Sandschicht dient der gleichmäßigen Lasteinleitung in den Kies. Ohne diese Ausgleichsschicht käme es aufgrund der unregelmäßigen Oberfläche der groben Kiesschicht leicht zu Schrägstellungen der Druckplatte, was zu Ungenauigkeiten bei der Lasteinleitung führen würde. Die Kiesschicht wurde so dick (20 cm) gewählt, um eine freie Einregelung des Korngerüstes unter der Prüflast gewährleisten zu können. Ungewollte Lastableitungen über die Wandung des Topfes infolge unvermeidbarer Verspannungen innerhalb des Kiespaketes werden durch ein umlaufend zur Reibungsverminderung eingelegtes Vlies minimiert.

Der Drucktopf ist zweigeteilt, wobei der untere Teil zur Aufnahme des als Untergrund einzubauenden mineralischen Materials dient und das aufsetzbare obere Rohrstück die Dränageschicht aufnimmt. Auf dem Untergrund kann so leicht die Dichtungsbahn und die geotextile Schutzlage eingebaut werden. Beide Schichten werden frei aufgelegt und nicht im Rand des Topfes eingeklemmt (verspannt), da eine solche Randeinspannung bei Nachgeben des Untergrundes eine Lastabtragung über die Dichtungsbahn in den Topfrand bewirken würde. Die damit verbundenen Störungen würden die in dem Versuch angestrebten Ergebnisse bis weit in die Fläche hinein beeinflussen und verfälschen.

Nach Ablauf der Prüfzeit wird die Wirksamkeit der Schutzlage durch Begutachtung des zu schützenden Elementes, der Dichtungsbahn, festgestellt. Entscheidend für die Beurteilung ist, daß die Kunststoffdichtungsbahn infolge der Belastung nicht über das festgesetzte Maß hinaus deformiert wird.

Da sich die Dichtungsbahn materialbedingt zu einem Teil elastisch verformt, läßt sich der während des Versuches unter voller Belastung erzwungene Zustand selbst unmittelbar nach Ausbau der Probe nicht mehr feststellen. Ein weiterer, großer Teil der zuerst noch erkennbaren Verformungen verliert sich bei Entlastung aufgrund des visko-elastischen Verhaltens des Kunststoffes immer mehr, so daß bereits nach relativ kurzer Zeit nur noch ein Bruchteil der ursprünglichen Deformationen vorhanden sind. Eine erste Methode, um zumindest den Umfang der

Verformungen dauerhaft festhalten zu können, war die Markierung der in der Dichtungsbahn sichtbaren Dellen unmittelbar nach dem Ausbau. Anzahl und Größe der Markierungen konnten dann später ausgezählt und ausgewertet werden und ergaben erste, zahlenmäßig faßbare Hinweise auf Unterschiede einzelner Schutzlagen. Bild 31 zeigt eine derart nach einem Versuch markierte Dichtungsbahn.

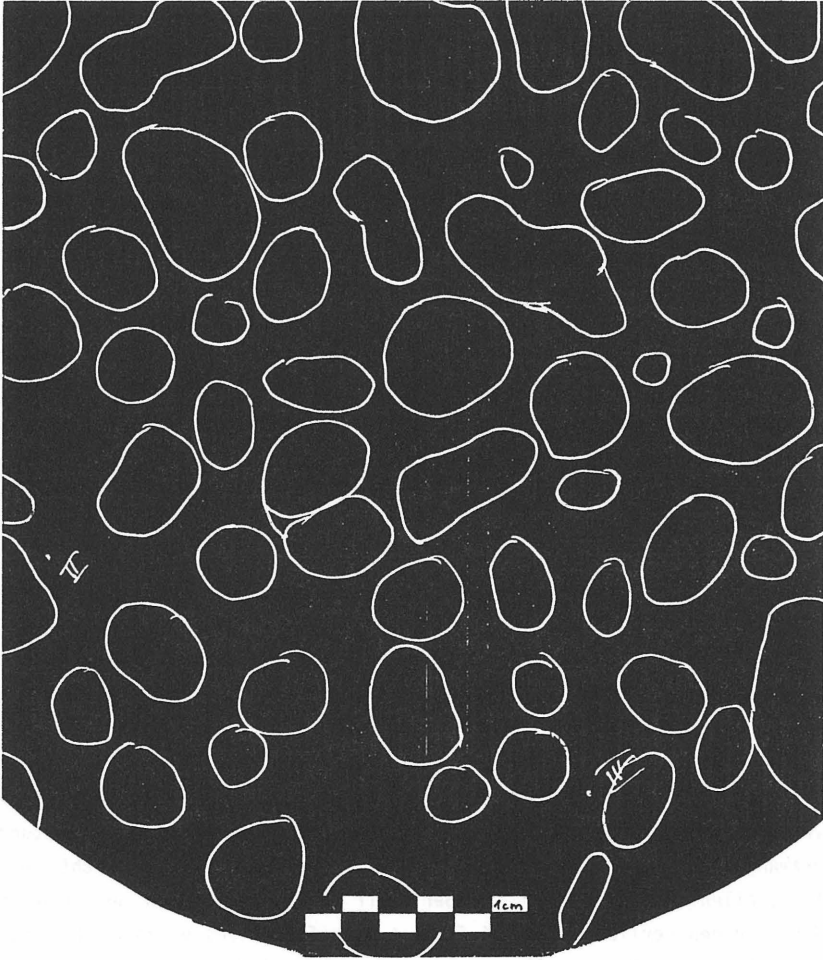


Bild 31: Nach dem Versuch markierte Dichtungsbahn
(verkleinerter Ausschnitt)

Um die tatsächlich auftretenden Verformungen möglichst genau feststellen zu können, wird nunmehr wegen der oben beschriebenen materialbedingten Schwierigkeiten ein Weichblech unter der Dichtungsbahn plaziert. Dieses aus einer Blei/Zinn (40/60) Legierung bestehende, ca. 0,5 mm dicke Blech (Orgelpfeifenblech) läßt sich sehr leicht, praktisch ohne elastischen Anteil verformen und konserviert so die während des Versuches aufgezwungenen Verformungen der Dichtungsbahn. Die Störungen, die sich bei diesem Verfahren durch den nicht zu vermeidenden Einfluß des Bleches auf die sich in der Dichtungsbahn einstellenden Verformungen ergeben, müssen bei dieser Prüfmethode in Kauf genommen werden.

Als Untergrund kann wahlweise ein in der jeweiligen Deponie als mineralisches Dichtungsmaterial vorgesehener Boden oder (gemäß BAM) ein Elastomer definierter Shore-Härte eingebaut werden. Bei Verwendung des mineralischen Materials ist der Boden möglichst gleichmäßig unter Einhaltung der für die Baumaßnahme geltenden Einbauwerte (Dichte, Wassergehalt) einzubringen. Bei Einsatz der künstlichen Unterlage wird eine 2 cm dicke Elastomer-Platte der Härte 50° Shore-A eingelegt.

Die Prüflast wird ohne Zeitverzögerung von Beginn an in voller Höhe eingestellt und über die Prüfdauer konstant gehalten.

5.3 Auswertung

Zur Bewertung der Wirkung einer Schutzlage werden folgende, mit einfachen Hilfsmitteln schnell festzustellende Kriterien herangezogen:

1. Es dürfen keine direkten Beschädigungen (Kerben, Löcher) der Oberfläche der Dichtungsbahn nach dem Versuch feststellbar sein (Definitionen s. Bild 32).
2. Die Dichtungsbahn darf lokal in ihrer Dicke nicht dauerhaft reduziert sein.
3. Die Dichtungsbahn darf nach Ausbau nur langwellige Verformungen mit weichen Übergängen zeigen, die eine Dehnung von maximal 0,25 % ergeben.

markanter Stellen (Höhen und Tiefen) der verformten Oberfläche. Die Auswertung erfolgt unter Zugrundelegung einer polygonartigen Verbindung dieser vermessenen Punkte. Die Dehnung ϵ berechnet sich in diesem Fall aus der Differenz der ursprünglich kürzesten (horizontalen) Verbindung zweier benachbarter Punkte l_{i1} und aus der sich durch die erzwungene, gegenseitige vertikale Verschiebung veränderten neuen Entfernung l_{i2} . Bei dieser Art der Berechnung ergibt sich für jedes Meßintervall i eine entsprechende Dehnung ϵ_i . In Bild 34 ist ein solcher polygonartiger Abschnitt dargestellt.

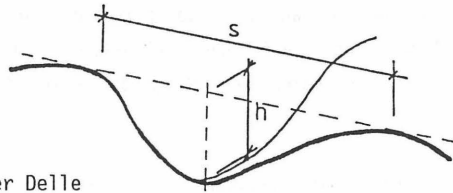
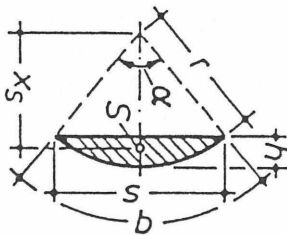


Bild 33.1: Vermessung einer Delle

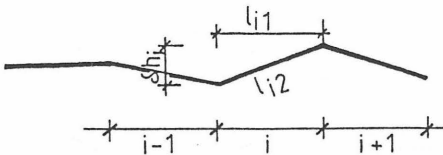


$$b = \pi \cdot r \cdot \alpha^\circ / 180^\circ$$

$$s = 2 \cdot r \cdot \sin(\alpha/2)$$

$$h = 0,5 \cdot s \cdot \tan(\alpha/4)$$

Bild 33.2: Kreisabschnitt zur Ermittlung von Dehnungen, aus [22]



$$l_{i2} = \sqrt{l_{i1}^2 + \delta h_i^2}$$

$$\delta l_i = l_{i2} - l_{i1}$$

Bild 34: Polygonzug zur Ermittlung von Dehnungen

Beide vorgestellten Möglichkeiten unterscheiden sich voneinander in bezug auf die erreichbare Genauigkeit und somit in der Aussagefähigkeit. Der Ansatz eines Kreisabschnittes gestattet nur eine sehr grobe Abschätzung der Geometrie, da sowohl die Auswahl der jeweiligen Meßachsen (für s) und

Meßpunkte (für h) als auch bereits schon die Wahl der vermeintlich maßgebenden Deformation subjektiv geschieht. Bei dieser Methode kann nicht erfaßt und berücksichtigt werden, inwieweit die zu bewertende Verformung in ihrer Gestalt von der idealisierten Schablone eines Kreisabschnittes abweicht.

Die Aussagekraft der Auswertung eines Polygonzuges ist unmittelbar abhängig von der richtigen Wahl der Schrittweite (Meßintervall) zwischen den einzelnen Meßpunkten. Bei einem entsprechend engen Abstand ist letztlich eine näherungsweise genaue Abbildung der verformten Oberfläche möglich. Da der Aufwand naturgemäß mit der Anzahl der Meßpunkte steigt, ist die Wahl eines geeigneten Meßintervalls wichtig. Die Schranke nach unten wird dabei von der Meßgenauigkeit der verwendeten Apparatur gesetzt.

Bild 35 zeigt die Dehnung, die sich bei Zugrundelegung eines Kreisabschnittes in Abhängigkeit vom Verhältnis der abmessbaren Größen Sehnenlänge s und Stich h (s/h) errechnet. Zum Vergleich ist das Maß der Dehnung eingetragen, die sich errechnet, wenn die gleiche Messung als Polygon mit 2 Abschnitten (je $s/2$) ausgewertet wird. Die Unterschiede werden umso geringer, je größer der Quotient aus s/h wird.

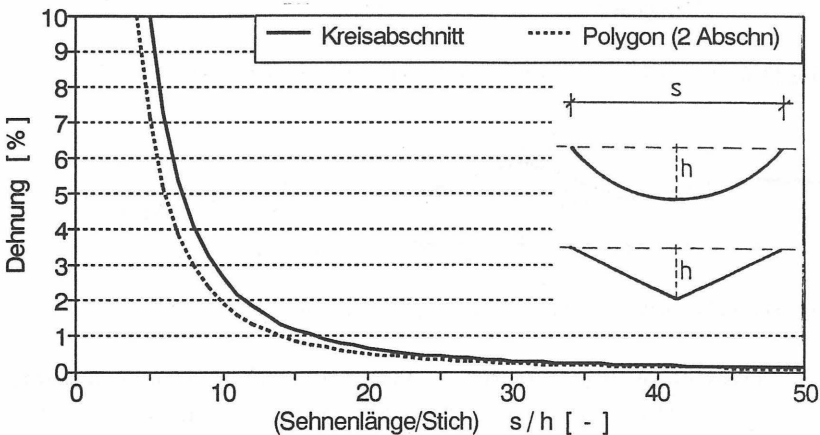


Bild 35: Dehnung in Abhängigkeit von s/h , (Kreisabschnitt)

Eine kompliziertere Auswertung der nach einem Belastungsversuch feststellbaren Verformungen ist nach der Richtlinie der BAM erforderlich. Danach gilt eine Schutzschicht als geeignet, wenn die nach dem 1000-Std.-Versuch feststellbaren Dellen maximalen Dehnungen von $\epsilon = 0,25\%$ entsprechen (gerechnet unter der Annahme einer Kugelkalotte) [2]. Die geforderte Annahme einer Kugelkalotte erzwingt eigentlich die Berücksichtigung der zweiaxialen Dehnung der Kunststoffdichtungsbahn, eine Aufgabe, die ohne weitere Vorgaben nicht eindeutig lösbar ist. Alle dem Verfasser bekannten Auswertungen berücksichtigen daher bisher auch lediglich die mittlere einaxiale Dehnung (Kreisabschnitt oder Polygon).

Da sich beim Ansatz einer kugelförmigen Verformung des Flächenelementes Dichtungsbahn keine entlang des Meridians (siehe Bild 36) gleichmäßige Dehnung einstellt, liegt die bei der Auswertung gebräuchliche Berechnung der mittleren einaxialen Dehnung zum Nachweis der maximalen Dehnung in jedem Fall auf der unsicheren Seite. Wie groß der Maximalwert tatsächlich ist, läßt sich wegen nicht vorhandener Kenntnisse der Lastein- und Lastableitung und des sich daraus ergebenden tatsächlichen Verhaltens der Dichtungsbahn nicht angeben.

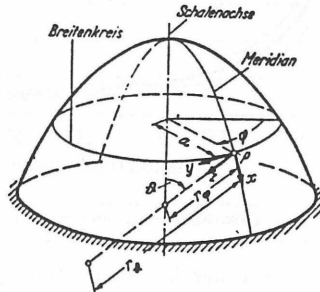


Bild 36: Rotationsschale mit Bezeichnungen, aus [23]

Neben den bisher angesprochenen Dehnungen des Gesamtquerschnittes stellen sich bei einer Verbiegung einer Dichtungsbahn über den Querschnitt veränderliche Dehnungen infolge Krümmung mit Maximalwerten für die Randfasern ein (siehe Bild 37). Die Dehnungen, die sich unter der Annahme, daß die neutrale Faser in der Mitte der Dichtungsbahn ($d_{KDB}/2$) liegt, in Abhängigkeit des Biegeradius errechnen, sind in Bild 38.1 wiedergegeben. Bild 38.2 zeigt einen Ausschnitt der Darstellung des Bildes 38.1 zur Verdeutlichung des Bereiches um 0,5 % Dehnung der Randfaser.

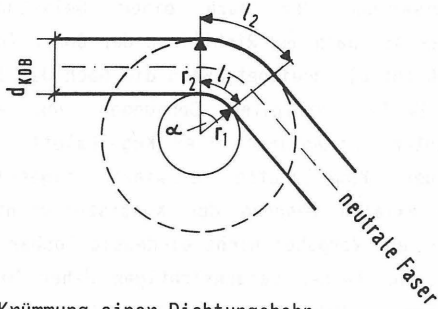


Bild 37: Krümmung einer Dichtungsbahn

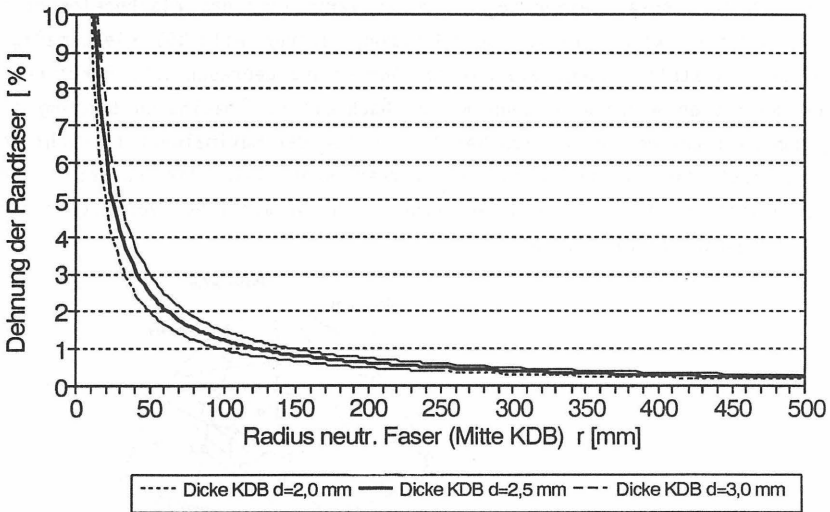


Bild 38.1: Dehnung der Randfaser infolge Krümmung

Der Darstellung Bild 38.2 kann entnommen werden, daß bei Biegeradien $r \leq 500$ mm die Randfaser einer Kunststoffdichtungsbahn mit einer Dicke von $d = 2,5$ mm bereits um mehr als 0,25 % gedehnt wird. Im Vergleich dazu: Die Dichtungsbahnen werden je nach Hersteller auf einem Stahlkern mit einem Durchmesser von bis zu ca. 16 cm ($r = 80$ mm) angeliefert, was bei einer Dicke $d_{\text{KDB}} = 2,5$ mm bereits eine Dehnung der Randfaser von $\epsilon_r \approx 1,4$ % bedeutet.

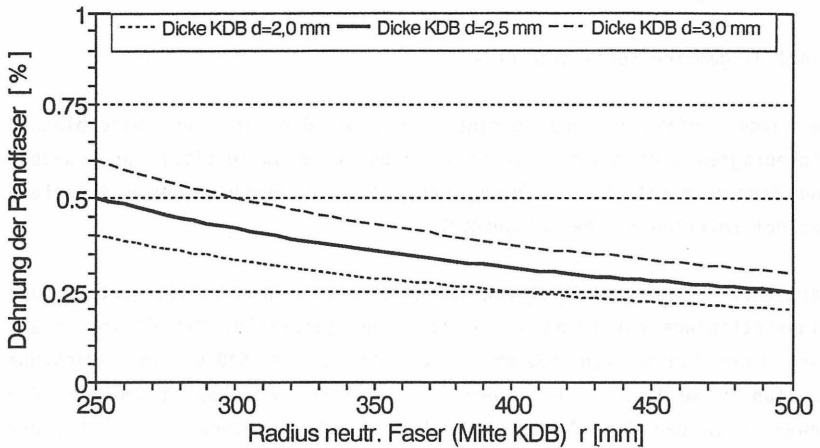


Bild 38.2: Dehnung der Randfaser infolge Krümmung (Ausschnitt)

Dehnungen der Dichtungsbahn infolge aufgezwungener Längenänderungen (Auslenkung aus der Horizontalen) können sich bei Ungleichmäßigkeiten örtlich bis zu einem gewissen Grad ausgleichen. Sich rechnerisch ergebende Dehnungsspitzen vergleichmäßigen sich dadurch, daß sich Material, sofern es nicht durch eine zu hohe Bodenreibung oder durch Fixierungen durch Kieskörner behindert wird, aus den weniger belasteten in die höher beanspruchten Bereiche hineinzieht. Für die Auswertung der verformten Dichtungsbahn bedeutet dies, daß Mittelungen über bestimmte Distanzen (z.B. Sehnenlänge Kreisausschnitt s) bei der Berechnung der Dehnungen der Wirklichkeit näher kommen, als die strenge, unmittelbare rechnerische Umsetzung der Neigung eines Meßabschnittes i in die entsprechende Dehnung ϵ_i .

Dehnungen der Randfasern ϵ_r infolge von Verkrümmungen der Dichtungsbahn treten dagegen immer genau dort auf, wo die Verbiegungen stattfinden. Ein Ausgleich dieser Dehnungen in weniger verkrümmte Nachbarbereiche ist aus geometrischen Gründen nicht möglich. Zur Ermittlung der an der Randfaser auftretenden maximalen Gesamtdehnung $\epsilon_{r\text{ges}}$ müssen beide Anteile addiert werden ($\epsilon_{r\text{ges}} = \epsilon_r + \epsilon$). Dieser Dehnung gerade der Randfaser könnte bei Betrachtung des Problems der möglichen Spannungsrißkorrosion eine erhöhte Bedeutung zukommen.

5.4 Rechnergesteuerte Meßwertaufnahme

5.4.1 Allgemeine technische Daten

Um eine objektive und genaue Aufnahme der in den Weichblechen eingepprägten Verformungen sicherzustellen, wird am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig eine rechnergesteuerte Abtastung des deformierten Bleches eingesetzt.

Kernstück der Abtasteinrichtung ist eine entsprechend modifizierte X/Y/Z-Flachbetтанlage der Firma ISEL-Automation, Eiterfeld. Mit dieser Anlage kann eine Fläche von 500 mm in X-Richtung und 540 mm in Y-Richtung abgefahren werden. In der Z-Achse ist ein Hub von 180 mm möglich. Die Bewegung in den drei Achsen erfolgt über Schrittmotoren, die mit einer zwischengeschalteten Steuer- und Verstärkereinheit (CNC-Controller) über einen Personalcomputer angesteuert werden. Die Wiederholgenauigkeit der Positioniereinrichtung wird mit 0,02 mm angegeben.

Zur eigentlichen Abtastung ist an der Z-Achse ein induktiver Wegaufnehmer der HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GmbH, vom Typ W 20 TK, montiert. Dieser Wegaufnehmer der Genauigkeitsklasse 0,2 hat bei einem Nennweg von ± 20 mm einen für die Messungen nutzbaren Gesamthub von 40 mm. Das von dem Aufnehmer erzeugte Signal wird in einem auch für die Speisung des Wegaufnehmers zuständigen Meßconverter verstärkt und in einer speziellen Endstufe in eine Stromstärke zwischen 4 und 20 mA umgewandelt. In einem nachgeschalteten Analog-Digital-Wandler wird die jeweils anliegende Stromstärke in einen computerverständlichen Binärcode übersetzt und über die RS 232C Schnittstelle an den Rechner weitergegeben. Die gesamte Anlage ist schematisch in Bild 39.1 dargestellt. Bild 39.2 zeigt eine Fotografie der Abtast- und Steuereinrichtung.

Zur gewünschten Positionierung des Wegaufnehmers sowie zur Meßwertaufnahme und -speicherung wurde am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig ein spezielles Programm (Programmiersprache: Quick Basic) entwickelt. Die höhenmäßige Abtastung der Reliefs geschieht dergestalt, daß der Wegaufnehmer auf bestimmte X/Y-Position gefahren wird. An jedem dieser Meßpunkte wird der Aufnehmer in die immer gleiche Z-Position abgesenkt, die so angelegt ist, daß die

Tastspitze jedesmal durch Kontakt mit dem abzufahrenden Blech verschoben wird. Die so aufgenommenen, der X/Y-Position zuordnenbaren Meßwerte können – unter Berücksichtigung nur der Höhendifferenzen der einzelnen Punkte – auf eine beliebige Referenzhöhe bezogen werden.

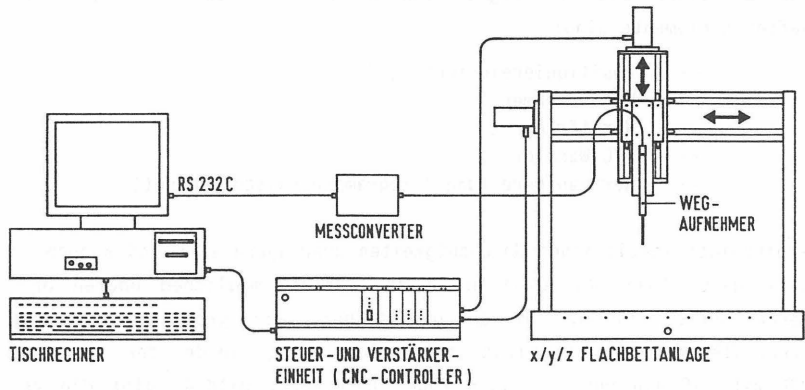


Bild 39.1: Abtasteinrichtung (schematisierte Darstellung)

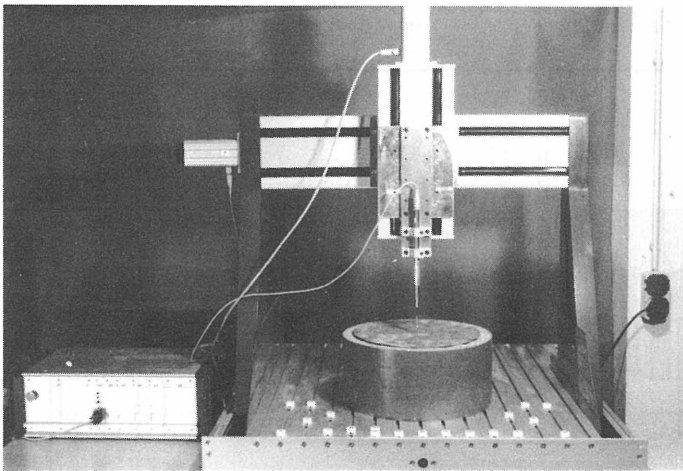


Bild 39.2: Abtasteinrichtung

5.4.2 Meßgenauigkeit des gesamten Abtastsystems

Mehrere der einzelnen Komponenten des gesamten Abtastsystems weisen Toleranzen auf, die zwangsläufig zu Ungenauigkeiten bei der Meßwerterfassung und -weitergabe führen. Die mit solchen Toleranzen behafteten Elemente sind:

- Positioniereinrichtung
- Wegaufnehmer
- Verstärker
- A/D-Wandler
- Werteaufbereitung (programmtechnisch bedingt)

Die einzelnen spezifischen Ungenauigkeiten überlagern sich und können im ungünstigsten Fall bei Addition zu den maximal möglichen oberen bzw. unteren Werten führen. Um zu untersuchen, wie groß die mögliche Streubreite des Gesamtsystems tatsächlich ist, wurde der Weggeber 1.000 mal auf ein und denselben Punkt abgesetzt. Bild 40 gibt die bei dieser Prozedur aufgenommenen Werte wieder. Die Meßwerte wurden umgerechnet in mm auf eine Referenzhöhe bezogen, deren Zahlenwert für die hier angestellte Betrachtung ohne Bedeutung ist. Jeder Peak der in Bild 40 dargestellten Kurve stellt einen Meßwert dar.

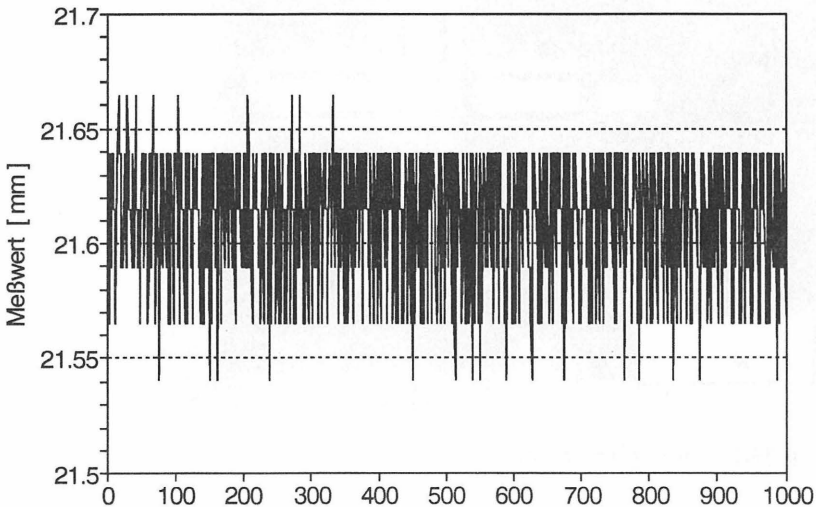


Bild 40: Z-Werte bei wiederholter Messung, ($n = 1.000$)

Der Darstellung kann entnommen werden, daß insgesamt 6 Werte in unterschiedlicher Häufigkeit registriert wurden. Die Streubreite reicht bei diesem Test der Wiederholgenauigkeit über 0,1236 mm (von 21,5404 bis 21,6644 mm). Die Aufteilung auf insgesamt nur 6 Zahlenwerte spiegelt die Arbeitsweise des A/D-Wandlers wider. Die analog anliegenden Signale (Stromstärke zwischen 4 und 20 mA) werden entsprechend der spezifischen Auflösung der eingesetzten Karte digitalisiert, wobei jeweils ein Stromstärkenbereich einer Zahl zugeordnet werden muß. Die insgesamt auftretenden Ungenauigkeiten gehen in diesem Fall über 5 Sprünge der A/D-Wandlung.

Aus der Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Meßwerte in Bild 41 geht hervor, daß keine symmetrische Dichtefunktion vorliegt, sondern eine Häufung bei dem zweit- und drittgrößten Wert zu beobachten ist. Eine Erklärung dieses Phänomens könnte in der über den Meßbereich des Wegaufnehmers schwankenden Linearitätsabweichung liegen, die bei der Meßwerterfassung und -verarbeitung nicht berücksichtigt wurde. Bei einer Streubreite von $< 0,125$ mm erschien eine solche programmtechnisch vorzunehmende Verfeinerung nicht erforderlich. Werden die insgesamt 25 als unterste (21,5404 mm) und oberste (21,6644 mm) Größen festgestellten Werte nicht berücksichtigt, so ergibt sich aus dem gesamten Abtastsystem eine Streubreite von lediglich $\approx 0,075$ mm.

In den folgenden Betrachtungen soll verdeutlicht werden, welche Auswirkungen die unvermeidbaren Ungenauigkeiten bei der Z-Wert-Erfassung auf die aus diesen Werten abgeleiteten Größen haben können. Bei diesen Überlegungen wird davon ausgegangen, daß zwischen zwei benachbarten, auf einer Ebene liegenden Meßpunkten eine Abweichung von 0,05 mm, bzw. 0,075 mm (2 bzw. 3 Sprünge aus der A/D-Wandlung) zu berücksichtigen ist.

Bei der Berechnung der Dehnung zwischen zwei Meßpunkten wird die sich durch den Höhenversatz δh_i ergebende Vergrößerung des Abstandes ($l_{i2} - l_{i1}$) dieser beiden Punkte herangezogen. Unter der Annahme, daß die Höhendifferenz $\delta h_i = 0,05$ mm (bzw. $\delta h_i = 0,075$ mm) beträgt, läßt sich, abhängig von dem angenommenen horizontalen Abstand l_{i1} der beiden Punkte, die jeweilige Dehnung ermitteln (Bezeichnungen siehe Bild 34). Bild 42 zeigt die auf diese Weise berechneten Dehnungen in Abhängigkeit des horizontalen Abstandes der Meßpunkte.

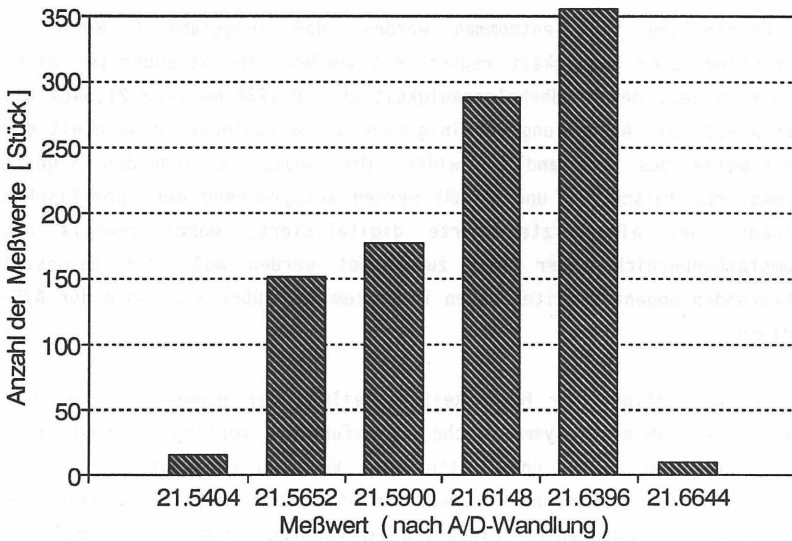


Bild 41: Häufigkeitsverteilung der Werte bei wiederholter Messung, ($n = 1.000$)

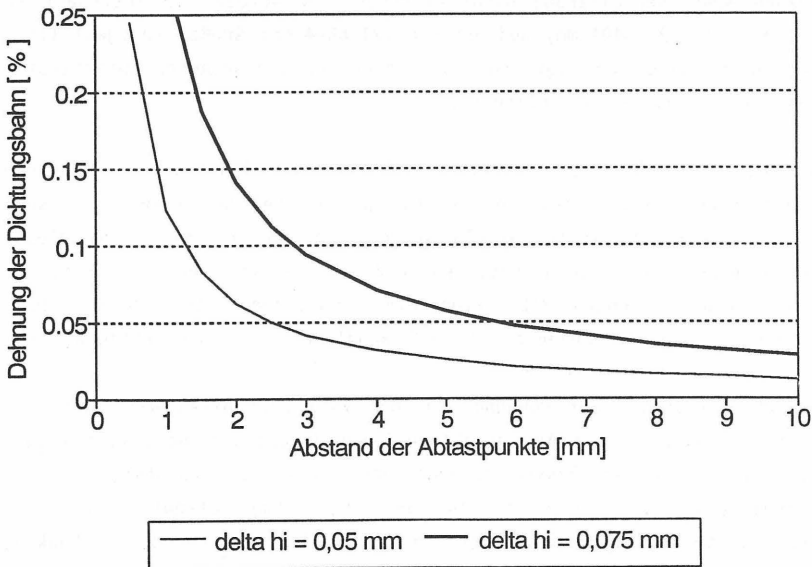


Bild 42: Rechnerische Dehnung infolge $\delta h_i = 0,05$ mm (bzw. $\delta h_i = 0,075$ mm) bei Variation der Abtastabstände l_i

Zur Berechnung der Randfaserdehnung ist der Krümmungsradius erforderlich. Unter der Annahme einer für den betrachteten Bereich konstanten Krümmung (kreisförmige Verformung), läßt sich der zugehörige Radius aus der Kenntnis der Lage dreier Punkte bestimmen (siehe dazu Bild 43). Werden nun die Höhendifferenzen zwischen den auf gleichem Niveau liegenden beiden äußeren Meßpunkten zu dem mittleren Punkt zu $\delta h_i = 0,05 \text{ mm}$ (bzw. $\delta h_i = 0,075 \text{ mm}$) angenommen, läßt sich der Krümmungsradius R_i in Abhängigkeit der Punktabstände l_i bestimmen.

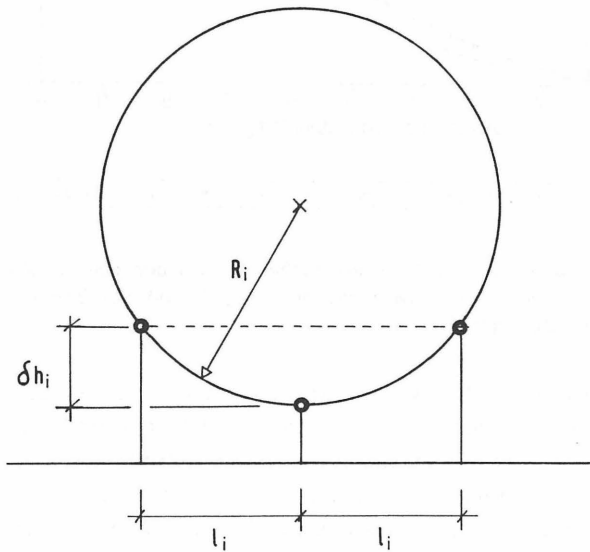


Bild 43: Bezeichnungen bei der Bestimmung des Krümmungsradius

Bild 44 zeigt die Krümmungsradien (Kreisradien), die sich unter Berücksichtigung der vorstehend erläuterten Annahmen für unterschiedliche Abstände zwischen den Abtastpunkten errechnen. Die in dieser Darstellung ebenfalls angegebenen Dehnungen der Randfaser beschreiben die Verformung des kurveninnenseitigen Randes (daher negative Werte => Stauchung) einer 2,5 mm dicken Dichtungsbahn. Die neutrale Faser wird als in der Mitte des Querschnittes liegend angenommen. Der Verlauf des Kreisbogens mit dem berechneten Krümmungsradius entspricht der Lage der neutralen Faser.

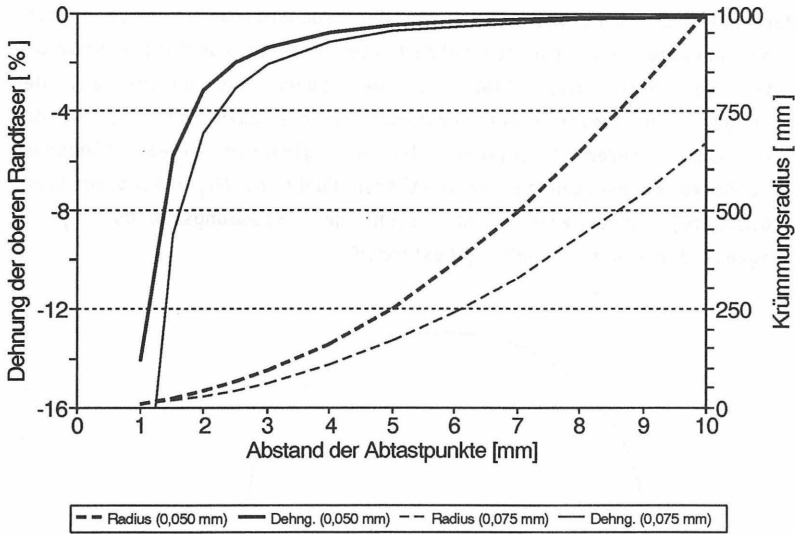


Bild 44: Krümmungsradius und rechnerische Dehnung der oberen Randfaser infolge $\delta h_i = 0,05$ mm (bzw. $\delta h_i = 0,075$ mm) bei Variation der Abtastabstände l_i

Die Darstellungen in Bild 42 und Bild 44 zeigen die in bezug auf die unvermeidlichen Ungenauigkeiten der Abtastanlage bestehenden unterschiedlichen Sensibilitäten der beiden zur Berechnung von Dehnungen (ges. Querschnitt, Randfaser) vorgestellten Ansätze. Je nach Größe der angesetzten Streubreite, ergeben sich für die Dehnung des gesamten Querschnittes durch Auslenkung aus der Horizontalen erst ab einem Abtastintervall von < 2 mm Werte von $> 0,25$ %, dem derzeit zulässigen Grenzwert. Bei Meßintervallen etwa $> 4 - 5$ mm liegen die Beträge der sich aus den systembedingten Ungenauigkeiten ergebenden rechnerischen Dehnungen in vernachlässigbaren Größenordnungen von $< 0,05$ %.

Werden die Meßwerte zur Berechnung der Randdehnungen herangezogen, so schlagen die Toleranzen erheblich stärker auf die Ergebnisse durch. Die Ursache dafür liegt darin, daß die für die Randfaserdehnungen verantwortliche Dicke der Dichtungsbahn (mit z.B. $d_{KDB} = 2,5$ mm) ein mit abnehmendem Krümmungsradius immer stärkeres Gewicht erhält. Je nach

angenommener Streubreite nimmt der Einfluß ab einem Meßintervall $< 4 - 5$ mm signifikant zu. Bei einem Meßabstand von 5 mm kann sich - bei Ansatz des vorgenannten Rechenmodells - bereits nur aus der unvermeidbaren Ungenauigkeit des Abtastsystems rechnerisch eine Randfaserdehnung von bis zu $\epsilon_r \approx 0,75$ % ergeben.

Für die geplanten Untersuchungen, in deren Verlauf in der Hauptsache die Dehnungen aus dem Vertikalversatz benachbarter Punkte verwertet werden, sind die sich auf diesen Ansatz beziehenden systembedingten Ungenauigkeiten von untergeordneter Bedeutung. Bei der Mehrzahl der Versuche wurden Dehnungen errechnet, die um Größenordnungen über dem Wert liegen, welcher sich aus den Toleranzen ergibt.

5.4.3 Meßintervalle

Bei einer punkweisen Abtastung einer Oberfläche steigt die Wiedergabegenauigkeit naturgemäß grundsätzlich mit der Anzahl der Meßpunkte. Die Genauigkeit wird allerdings andererseits auch bestimmt durch das Verhältnis der Größenordnung der abzutastenden Verformungen gegenüber den Abständen der Abtastpunkte (Abtastintervalle). Kleine Verformungen können nur mit entsprechend geringen Abtastintervallen erfaßt werden, während größere Verformungen bei einer vergleichbaren Wiedergabegenauigkeit weitere Meßabstände gestatten.

Zur Klärung der Frage, welches Abtastintervall das geeignete zur Erfassung der bei der Prüfung der Wirksamkeit von geotextilen Schutzlagen auftretenden Verformungen sein könnte, wurden folgende Überlegungen angestellt: Das Relief, welches aufgenommen werden soll, zeigt wellenförmige Erhöhungen und Vertiefungen. Die Abstände der einzelnen Täler, bzw. Berge ergeben sich aus den Abständen der Kieskörner der Dränageschicht. Üblicherweise wird ein Kies der Körnung 16/32 mm verwendet, so daß sich in der Regel ein minimaler Abstand von Wellental zu Wellental von ca. 16 mm einstellen sollte. Dieser Abstand gibt das Maß vor, welche Genauigkeit mit einem gewählten Abtastintervall jeweils erreichbar ist.

Zur Quantifizierung der Auswirkungen unterschiedlicher Abtastabstände wird im folgenden statt des unregelmäßigen Reliefs, welches bei Verwendung einer Kiesschüttung entsteht, eine mathematisch genau beschreibbare Sinusschwingung betrachtet. Als Maß für die Genauigkeit der Wiedergabe der abgetasteten Welle kann die erfaßbare Winkelsumme herangezogen werden. Dazu sind die Winkeländerungen α_i des die Meßpunkte verbindenden Polygonzuges an jedem Stützpunkt zu ermitteln und aufzuaddieren (siehe dazu Bild 45). Die Summe läßt sich mit der exakt bekannten, insgesamt von der Sinusschwingung durchlaufenen Winkeländerung vergleichen und ermöglicht so eine Aussage zu der mit der punktuellen Abtastung erreichten Genauigkeit.

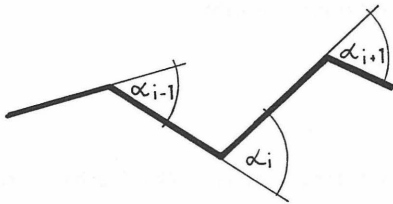


Bild 45: Polygonzug mit Bezeichnungen

Für jedes Abtastintervall ergibt sich, je nach Stellung der Meßpunkte auf der Sinuswelle, eine im Hinblick auf die Genauigkeit der Erfassung optimale und ungünstigste Plazierung. In der folgenden Darstellung werden beide Fälle am Beispiel eines einer halben Periode der Sinusschwingung entsprechenden Meßabstandes verdeutlicht. Bild 46.1 zeigt die für diese Konstellation optimale Plazierung, mit der der volle Ausschlag der Welle erfaßt wird. Bild 46.2 gibt demgegenüber die ungünstigste Anordnung wieder, durch welche die Welle gar nicht als solche erkannt werden könnte. Jede andere Stellung ergibt eine zwischen den beiden dargestellten Extrema liegende Genauigkeit der Abbildung.

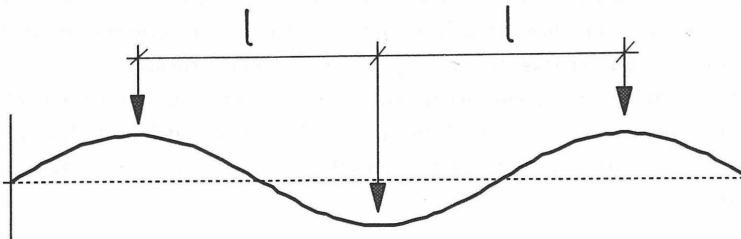


Bild 46.1: Optimale Plazierung der Abtastung

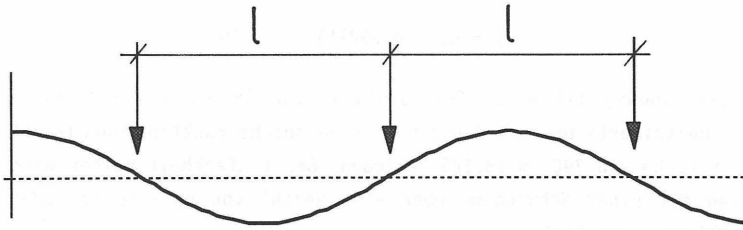


Bild 46.2: Ungünstigste Plazierung

Zur Anpassung der Sinusfunktion

$$y = \sin t \quad (1)$$

an bestimmte Verhältnisse, kann diese Grundfunktion verallgemeinert werden [24], [25]:

$$y = a \sin (\omega t + \xi) \quad (2)$$

Über den Faktor ω ist eine Veränderung der Periodenlänge (gleichmäßige Stauchung oder Dehnung) möglich. Die ursprüngliche Periodenlänge 2π verändert sich auf

$$T = 2\pi/\omega \quad (3)$$

Die verallgemeinerte Grundfunktion (2) kann so verändert werden, daß sie eine Schwingung mit einer Periodenlänge T von 16 mm (entspr. dem minimalen Kieskornabstand) beschreibt. Die über den Faktor a steuerbare Amplitude ist für die nachfolgenden Betrachtungen unerheblich und wird daher zu $a = 1$ gesetzt.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad \omega &= 2\pi/16 \\ \omega &= \pi/8 \end{aligned} \quad (4)$$

Der Summand ξ bewirkt eine Verschiebung der Sinuskurve in Richtung der t -Achse um ξ/ω . Wird dieser Summand zu $\xi = \pi/2$ gesetzt, so beschreibt die Funktion

$$y = \sin (\pi t/8 + \pi/2) \quad (5)$$

oder

$$y = \cos (0,3927t) \quad (6)$$

eine Sinusschwingung mit einer Periodenlänge von 16 mm, die mit ihrem Maximum (Scheitelwert) bei $t = 0$ beginnt. Eine solche Funktion durchläuft über eine Strecke von 290 mm 18,125 Perioden. Der Einfachheit halber wird im weiteren mit einer Schwingung über eine Anzahl von $n_p = 18$ Perioden (entspr. 288 mm) gerechnet.

Der Betrag der Winkelveränderung W [Grad], die pro Periode von einer derartigen Funktion (5) durchlaufen wird, beträgt

$$W = 4 \cdot w \quad (7)$$

(Bezeichnungen siehe Bild 47)

$$\text{mit } w = |f'(T/4)| \quad (8)$$

$$\text{und } f'(t) = 0,3927 \cos(0,3927t + \pi/2) \quad (9)$$

$$\Rightarrow f'(T/4) = 0,3927 \cos(0,3927 \cdot 4 + \pi/2)$$

$$f'(T/4) = -0,3927$$

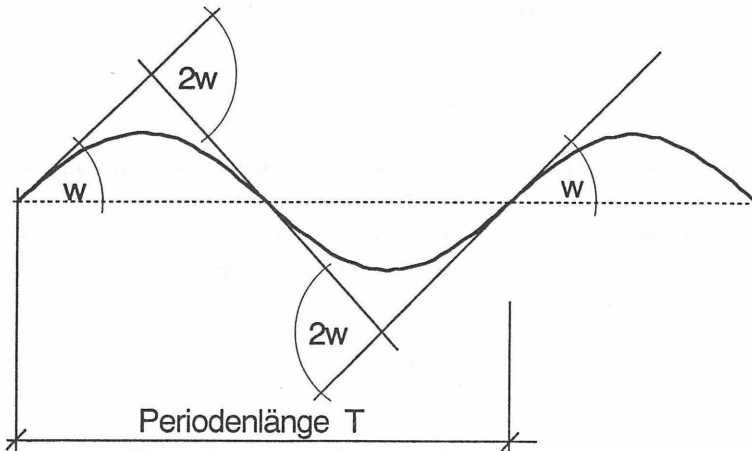


Bild 47: Sinusschwingung mit Bezeichnungen

Die gesamte Winkelveränderung W_{ges} [Grad] der betrachteten Funktion über einen Lauf von 18 Perioden ($n_p = 18$) ergibt sich somit zu

$$\begin{aligned} W_{\text{ges}} &= n_p \cdot W \\ W_{\text{ges}} &= 18 \cdot 4 \cdot 0,3927 \quad (180/\pi) \\ \underline{W_{\text{ges}} &= 1620^\circ} \end{aligned} \quad (10)$$

In Tabelle 5 sind die entsprechenden Werte für unterschiedliche Periodenlängen wiedergegeben.

Periodenlänge [mm]	Anzahl Perioden n_p	Winkelveränderungen W_{ges} [Grad]
12	24	2.880
16	18	1.620
20	14	1.008
24	12	720
32	9	405
36	8	320

Tabelle 5: Winkelveränderungen W_{ges} bei verschiedenen Periodenlängen

Die folgenden Abbildungen geben die mit einem Polygonzug erfaßbare Winkelveränderung, bezogen auf die tatsächliche, gesamte von der abgetasteten Schwingung durchlaufene Winkelveränderung, wieder. Die Kurven stellen die von der Schrittweite zwischen den Meßpunkten (Abtastintervall) abhängigen Ergebnisse dar. Bild 48.1 zeigt die erreichbare Genauigkeit beispielhaft für eine Periodenlänge von 16 mm, Bild 48.2 die für 32 mm. Es wird dabei zwischen den Ergebnissen der optimalen und der ungünstigsten Plazierung unterschieden. In Bild 49 sind die bei optimaler Plazierung erreichbaren Werte für die auch in der Tabelle 5 erfaßten Periodenlängen (Abstand der Wellentäler) zusammengefaßt.

Aus den Darstellungen ist ersichtlich, daß die Plazierung ohne große Bedeutung für die erreichbare Genauigkeit der Abtastung ist. Eine Ausnahme ist nur festzustellen, wenn die Schrittweite ein Vielfaches des Halben der Periodenlänge beträgt. Bei diesen Kombinationen klaffen die Ergebnisse der optimalen und der ungünstigsten Plazierung deutlich auseinander. Derartige Erscheinungen treten bei der Abtastung einer

unregelmäßigen Schwingung nicht in dem wie für die Sinusschwingung beobachteten Maße auf.

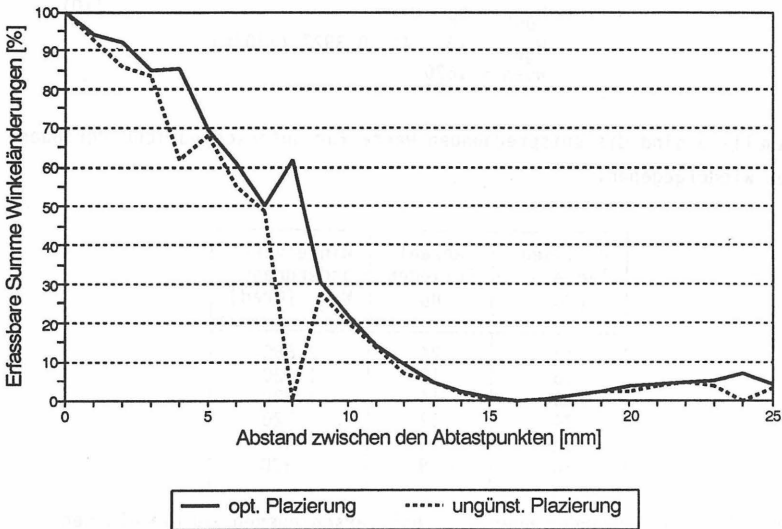


Bild 48.1: Genauigkeit bei Variation der Schrittweite
Periodenlänge 16 mm (auf 288 mm)

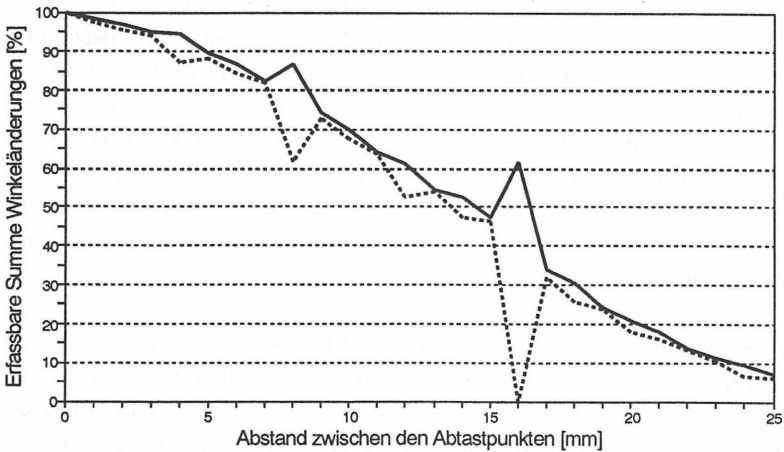


Bild 48.2: Genauigkeit bei Variation der Schrittweite
Periodenlänge 32 mm (auf 288 mm)

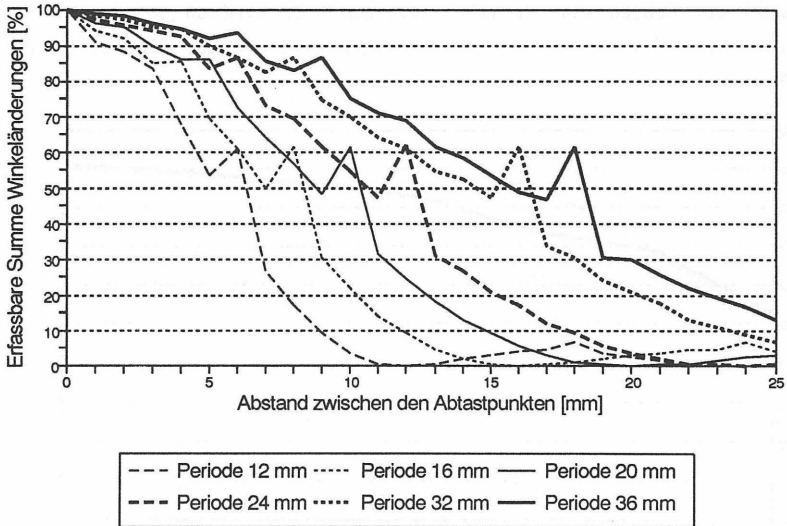


Bild 49: Genauigkeit bei optimaler Platzierung
für unterschiedliche Periodenlängen

Ab einem Abstand zwischen den Abtastpunkten von ca. 5 mm können - in Bezug auf die Erfassung der Winkelveränderungen - bei Periodenlängen von $T \geq 24$ mm Genauigkeiten von $> 85\%$ erreicht werden (siehe dazu Bild 50). Der mittlere Abstand der Eindrückungen von Einzelkörnern einer Schüttung der Körnung 16/32 dürfte sich etwa in einer dieser Periodenlänge entsprechenden Größenordnung (um 24 mm) bewegen. Eine Abtastung einer durch eine Kiesschüttung produzierten Welle sollte daher eine vergleichbare Genauigkeit erbringen.

5.4.4 Abtastbilder und ihre Auswertung

Bei einer punktuellen Abtastung der deformierten Proben sind mit dem am Institut verwendeten System grundsätzlich zwei Arten der Meßwertaufnahme und Auswertung möglich. Eine Art ist die Abtastung entlang einer Achse. Die so gewonnenen Werte gestatten eine Bewertung eines Schnittes. Die Aussagegenauigkeit im Hinblick auf die Bewertung der gesamten Fläche läßt sich in diesem Fall durch die Erfassung mehrerer Meßachsen beeinflussen.

Die Wahl der Achsen kann zufällig erfolgen oder wird so gesteuert, daß die augenscheinlich am stärksten verformten Bereiche des Bleches erfaßt werden.

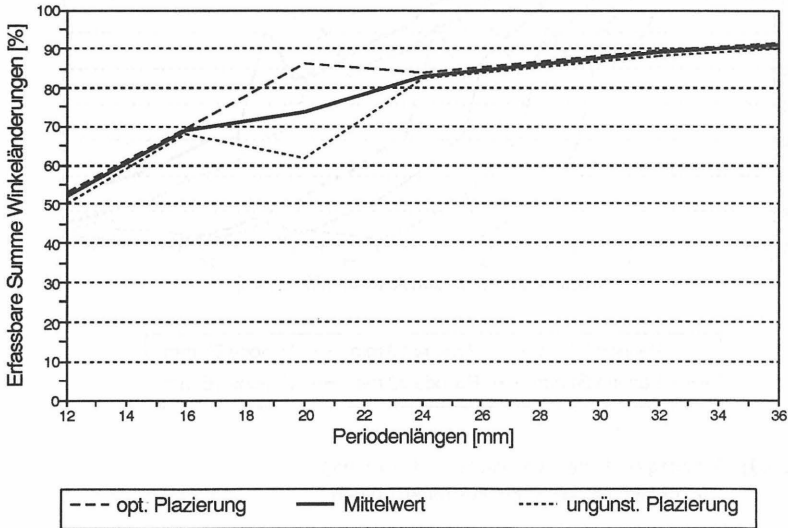


Bild 50: Genauigkeit der Abtastung bei einer Schrittweite von 5 mm für verschiedene Periodenlängen

Eine weitere Möglichkeit ist die quasi flächige Abtastung der Probe. Dazu wird die Oberfläche mit einem Raster überzogen, dessen Netzweite das Maß der möglichen Wiedergabegenauigkeit vorgibt. Die Punkte können in diesem Fall in allen Richtungen miteinander verknüpft werden.

Das am Institut für Grundbau und Bodenmechanik entwickelte Steuerprogramm gestattet beide Möglichkeiten der Abtastung. Bei der Erfassung von Meßachsen kann die Anzahl der Achsen und Größe der Abtastintervalle frei bestimmt werden. Die Ausrichtung der Meßachsen geschieht dabei automatisch entsprechend der gewählten Anzahl n_A so, daß sich gleiche Winkel $180^\circ/n_A$ zwischen den Schnitten ergeben. Bild 51 zeigt eine solche Aufteilung beispielhaft für 6 Meßachsen. Durch eine entsprechende Ausrichtung der Probe können Bereiche bei Bedarf gezielt in eine Meßachse hineingebracht werden.

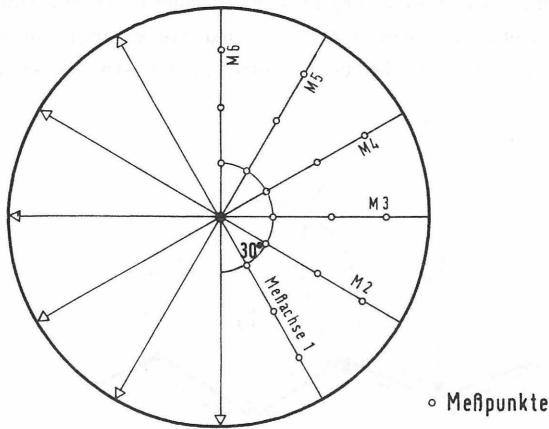


Bild 51: Abtastung mit Meßachsen, (Anordnung von 6 Achsen)

Die Auswertung der Meßwerte erfolgt in einem gesonderten Programm, in welchem – wie bereits vorgestellt – unter Zugrundelegung einer polygonartigen Verbindung die rechnerischen Dehnungen zwischen zwei Punkten ermittelt werden. Als weitere Größe wird die über jedem Stützpunkt auftretende Winkeländerung des Polygonzuges festgehalten. In einem weiteren Programmteil kann für jeden Meßpunkt, bei Ansatz einer kreisförmigen Verbindung des jeweiligen Punktes mit den beiden links und rechts benachbarten, die aktuelle örtliche Krümmung (Kreisradius) ermittelt werden (siehe dazu Bild 52).

Bei Wahl einer quasi flächigen Abtastung ist der Netzaabstand des quadratischen Rasters frei wählbar. Die Abtastung erfolgt – angepaßt an die aus den Abmessungen des Drucktopfes begrenzten Probengrößen ($\phi \approx 300 \text{ mm}$) – bis zu einem maximalen Abstand (Radius) von 145 mm zu dem in die Mitte der Probe gelegten Startpunkt. Bild 53 zeigt die Meßpunkte eines solches Abtastschemas. Alle Punkte werden mit auf die Mitte der kreisrunden Proben bezogenen x- und y-Koordinaten und dem zugehörigen abgetasteten z-Wert gespeichert.

Zur Auswertung des Meßwertrasters wird in einem für diese Arbeit entwickelten BASIC-Programm die Beziehung jedes der angefahrenen Punkte zu seinen jeweils 8 Nachbarpunkten überprüft (siehe Bild 54). Die sich

aus den Relationen zu diesen ergebenden Dehnungen (Berechnung analog Meßachsen) werden untereinander verglichen und die maximale Dehnung wird als sogenannte "rechnerische Dehnung" - dem betrachteten Punkt zugehörig - festgehalten.

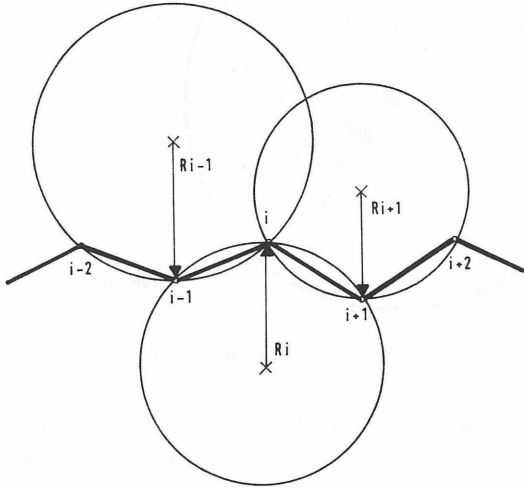


Bild 52: Bestimmung der örtlichen Krümmung (Kreisradius)

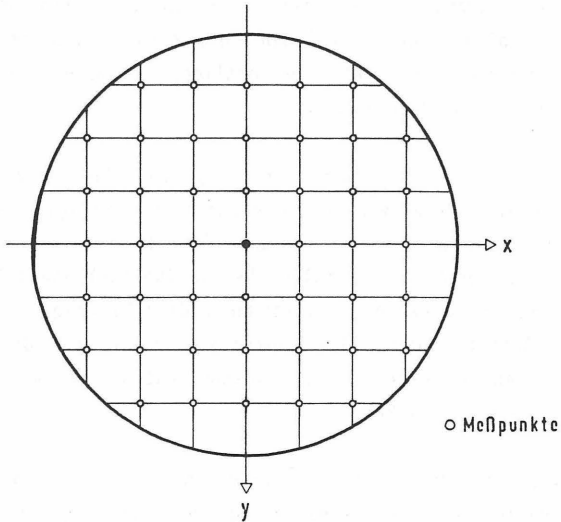


Bild 53: Abtastung mit Raster

Weiter werden die Mittelwerte der jeweiligen beiden Dehnungen, die sich zu den auf einer Achse liegenden Nachbarpunkten berechnen, ermittelt. Der Maximalwert wird als "mittlere Dehnung" gespeichert. (Vier Achsen: Horizontale, Vertikale, zwei Diagonalen)

Als dritte Größe wird der minimale Krümmungsradius ermittelt. Diese Größe wird aus den vier unter Verwendung der jeweils drei Meßpunkte der vier Achsen berechenbaren Krümmungsradien herausortiert. Zusammen mit der sich daraus ergebenden Dehnung der Randfaser ϵ_r werden diese Werte dem gerade betrachteten Punkt zugeordnet. Die zu berücksichtigende Dicke der Kunststoffdichtungsbahn d_{KDB} wird über die Dateneingabe bestimmt.

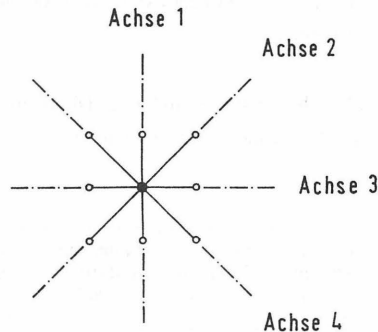


Bild 54: Bei der Auswertung einbezogene Nachbarpunkte / Achsen

In einem Nachlauf werden diese einzelnen Wertegruppen unter Einbeziehung der Ergebnisse für alle Punkte einer Probe statistisch ausgewertet [26]. Folgende Größen werden ausgeworfen:

- Minimum
- Maximum
- Arithmetisches Mittel
- Standardabweichung
- Varianz
- Variationskoeffizient
- Häufigkeitsverteilung
- Erwartungswert

5.4.5 Aussagekraft der Ergebnisse

aus der rechnergesteuerten Meßwertaufnahme und -auswertung

5.4.5.1 Einfluß der systembedingten Ungenauigkeiten

Abschnitt 5.4.2 behandelte bereits die Meßungenauigkeit des gesamten Abtastsystems. Durch Abtastung einer ebenen Fläche (Glasplatte) wurde versucht, die in diesem Abschnitt unter Ansatz der festgestellten Toleranzen abgeschätzten Auswirkungen der systembedingten Ungenauigkeiten auf die Ergebnisse der Auswertung zu bestätigen. Es wurde die rasterförmige Meßwerterfassung und die dazu entwickelte, im vorstehenden Kapitel beschriebene Auswertung eingesetzt. Bei der eingestellten Netzweite von 5 mm werden auf der im Durchmesser 290 mm messenden Fläche insgesamt 2.627 Punkte angefahren.

In den Tabellen 6.1 (statistische Größen) und 6.2 (Häufigkeitsverteilung) sind die mit dem BASIC-Programm ausgewerteten Ergebnisse dieses Versuches zusammengestellt.

Statistische Größe	rechn. Dehnung [%]	mittl. Dehnung [%]	Krümmungs- Radius [mm]	Dehnung der o Randfaser [%]
Minimum	0,0003	0	153,7	- 0,8128
Maximum	0,02	0,0128	> 100000	0,7872
Arithmetisches Mittel	0,0034	0,0020	-	0,0133
Standardabweichung	0,0025	0,0015	-	0,2442
Varianz	0	0	-	0,0596
Variationskoeffizient	0,74	0,76	-	18,31
Erwartungswert	0,0046	0,0026	-	0,0993

Tabelle 6.1: Statistische Größen, Abtastung Glasplatte

Die Auswertung der Abtastung der ebenen Glasplatte bestätigt im wesentlichen - unter Zugrundelegung eines Meßintervalls von 5 mm - die Abschätzung der Auswirkungen aus den unvermeidbaren Ungenauigkeiten des Abtastsystems. Die in 4 Fällen (aus 2.617 Meßpunkten) aufgetretene Dehnung ϵ von $0,0162 < \epsilon \leq 0,02$ % liegt noch unter der mit $\epsilon < 0,05$ % abgeschätzten Größenordnung. Erwartungsgemäß schlagen die Toleranzen bei der Ermittlung der Randfaserdehnungen ϵ_r infolge Krümmung mit Maximalwerten von bis zu $\epsilon_r \approx 0,8$ % (geschätzt $\epsilon_r \approx 0,75$ %) stärker zu

Buche, konnten aber bei der Raster-Abtastung in etwa in der vorab geschätzten Größenordnung nachgewiesen werden. Wie sich aus der Häufigkeitsverteilung entnehmen läßt, liegt der weitaus größte Teil der berechneten Randfaserdehnungen deutlich näher um den theoretisch für diesen Versuch korrekten Wert von $\epsilon_r = 0,0 \%$.

- Häufigkeitsverteilung -			
rechnerische Dehnung		Dehnung infolge Krümmung*	
Fraktion [%]	Werte [Anzahl]	Fraktion [%]	Werte [Anzahl]
< 0,0048	1.038	< - 0,64	14
< 0,0067	551	< - 0,49	69
< 0,0086	838	< - 0,33	155
< 0,0105	61	< - 0,17	352
< 0,0124	58	< - 0,01	547
< 0,0143	0	< 0,15	455
< 0,0162	67	< 0,31	820
< 0,0181	0	< 0,47	159
≤ 0,0200	4	< 0,63	42
		≤ 0,79	4

* Dehnung der oberen Randfaser

Tabelle 6.2: Häufigkeitsverteilung, Abtastung Glasplatte

5.4.5.2 Eignung der punktuellen Abtastung zur Bewertung einer Fläche

Zum Nachweis der grundsätzlichen Eignung der punktuellen, rasterförmigen Abtastung eines im Belastungsversuch verformten Weichbleches wurde eine Probe (GEDE2) aus einer später näher beschriebenen Versuchsreihe 6 mal vermessen. Untersucht wurde, ob das Ergebnis einer mit einem Intervall von 5 mm aufgenommenen Oberfläche unabhängig von der Ausrichtung der Probe zu dem quadratischen Meßraster ist. Dazu wurde das Blech zu jeder Aufnahme um 15° verdreht.

Eine aus den Meßwerten entwickelte Abbildung des Bleches ist als Bild 55 wiedergegeben. Die Verformungen sind 10-fach überhöht dargestellt. Die Probe hat einen Durchmesser von ca. 300 mm. Von der Abtastung wird ein Bereich mit einem Radius von 145 mm um den Mittelpunkt erfaßt. Das für die Darstellung der Oberfläche verwendete Programm SURFER (von Golden

Software) extrapoliert über die erfaßten Daten hinaus und produziert die Abbildung einer scheinbar quadratischen Fläche. Die Eckbereiche sind daher für eine Auswertung ohne Bedeutung.

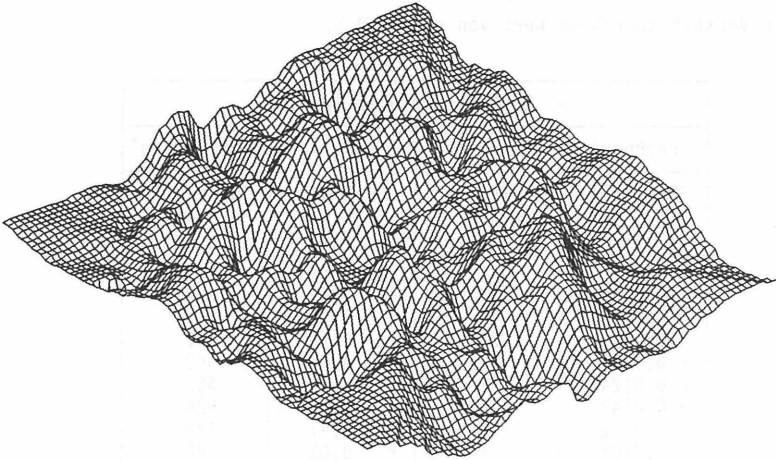


Bild 55: Abbildung der Probe GEDE2 (10-fach überhöhte Darstellung)

Die Ergebnisse der Auswertung der 6 Abtastungen sind in Tabelle 7 nebeneinander aufgetragen wiedergegeben.

Die Ergebnisse der Auswertungen zeigen eine gute Übereinstimmung über alle 6 Messungen. Die fast gleichen Werte der arithmetischen Mittel der ermittelten Größen belegen ebenso wie die gleichmäßigen Erwartungswerte und Maximalwerte, daß die Ausrichtung des Bleches in bezug auf das Abtastraster bei dem eingestellten Meßintervall von 5 mm einen nur sehr geringen Einfluß auf die Ergebnisse hat. Die Bilder 56.1 – 56.4 zeigen vergleichend beispielhaft einige der aus den Messungen berechneten Größen.

Die Oberfläche des Prüflings wird diesen Ergebnissen zufolge bei der quasi flächigen Aufnahme (Raster mit einem Meßintervall von 5 mm) im Zusammenwirken mit der Weiterverarbeitung der Meßwerte sicher erfaßt und beschrieben.

		Teilversuch					
		1	2	3	4	5	6
		***** MINIMUM *****					
rechn. Dehnung	[%]	0,0224	0,0288	0,0399	0,0200	0,0288	0,0224
mittl. Dehnung	[%]	0,0125	0,0201	0,0192	0,0168	0,0103	0,0073
Krümmungsradius	[mm]	12,91	12,39	13,71	12,97	11,65	11,06
Dehnung der Randfaser	[%]	- 9,68	-10,08	- 9,11	- 9,64	-10,72	-11,29
		***** MAXIMUM *****					
rechn. Dehnung	[%]	6,16	7,19	6,35	6,21	7,19	7,63
mittl. Dehnung	[%]	5,16	5,19	5,16	5,29	5,36	5,10
Krümmungsradius	[mm]	1.276	504	1.248	1.673	887	840
Dehnung der Randfaser	[%]	4,58	4,84	4,67	4,88	4,73	4,71
		***** ARITHMETISCHES MITTEL *****					
rechn. Dehnung	[%]	1,41	1,42	1,42	1,41	1,41	1,41
mittl. Dehnung	[%]	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89
Krümmungsradius	[mm]	64,94	64,73	65,11	65,67	66,08	65,91
Dehnung der Randfaser	[%]	- 1,05	- 1,16	- 1,26	- 1,17	- 1,17	- 1,20
		***** VARIATIONSKOEFFIZIENT *****					
rechn. Dehnung		0,7584	0,7652	0,7692	0,7613	0,7758	0,7776
mittl. Dehnung		0,8498	0,8478	0,8540	0,8565	0,8759	0,8761
Krümmungsradius		0,7311	0,6462	0,7651	0,8617	0,7287	0,7720
Dehnung der Randfaser		2,366	2,132	1,922	2,105	2,095	2,045
		***** ERWARTUNGSWERT *****					
rechn. Dehnung	[%]	1,713	1,776	1,727	1,721	1,770	1,799
mittl. Dehnung	[%]	1,161	1,162	1,150	1,162	1,163	1,144
Krümmungsradius	[mm]	145,7	88,2	144,8	184,0	113,2	109,3
Dehnung der Randfaser	[%]	- 0,35	- 0,43	- 0,60	- 0,47	- 0,37	- 0,38

Tabelle 7: Ergebnisse der 6-fachen Messung, (Drehung jeweils 15°)

Die Auswertung derselben Probe durch eine Abtastung entlang sich im Mittelpunkt kreuzender Meßachsen kann naturgemäß keine derart sichere Aussage zur Verformung der gesamten Prüffläche gewährleisten. Um die Aussagekraft beider Arten der Abtastung an einem Beispiel vergleichen zu können, wurde die Probe GEDE2 zusätzlich zu dem Raster auf insgesamt 12, gegeneinander um 15° verdrehten Achsen vermessen. Als Meßintervall war ebenfalls 5 mm eingestellt, so daß bei einer für die Auswertung

berücksichtigten Länge von 240 mm pro Achse 49 Punkte angefahren wurden. In der Tabelle 8 sind die Ergebnisse aus diesen Abtastungen wiedergegeben.

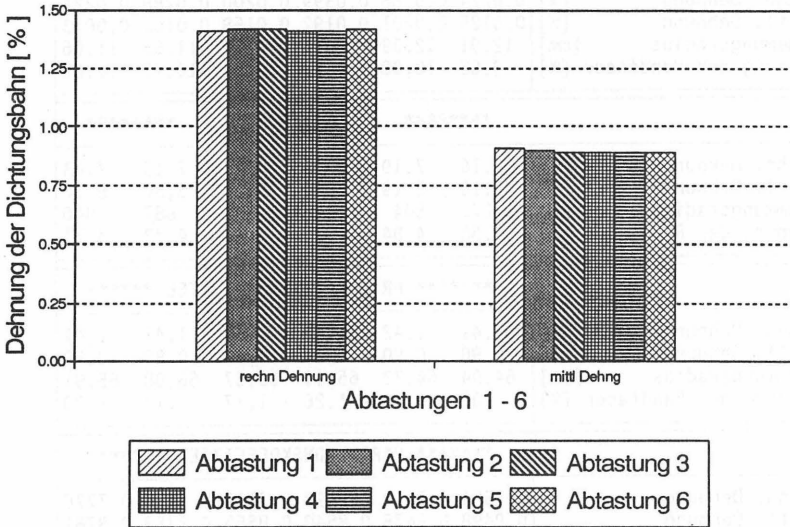


Bild 56.1: Arithmetisches Mittel der Dehnungen (Probe GEDE2)

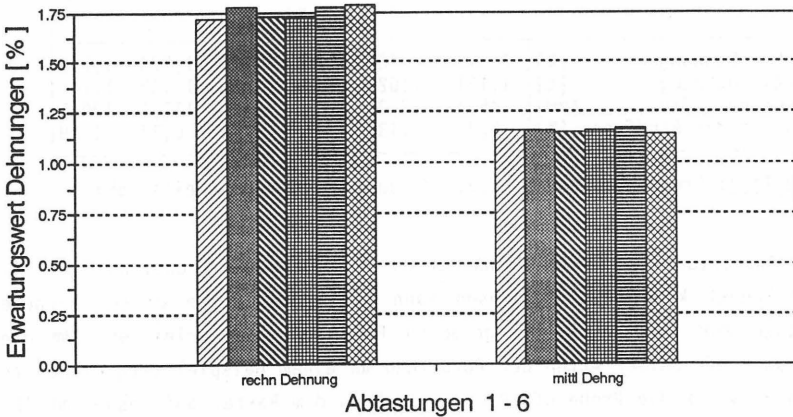


Bild 56.2: Erwartungswert der Dehnungen (Probe GEDE2)

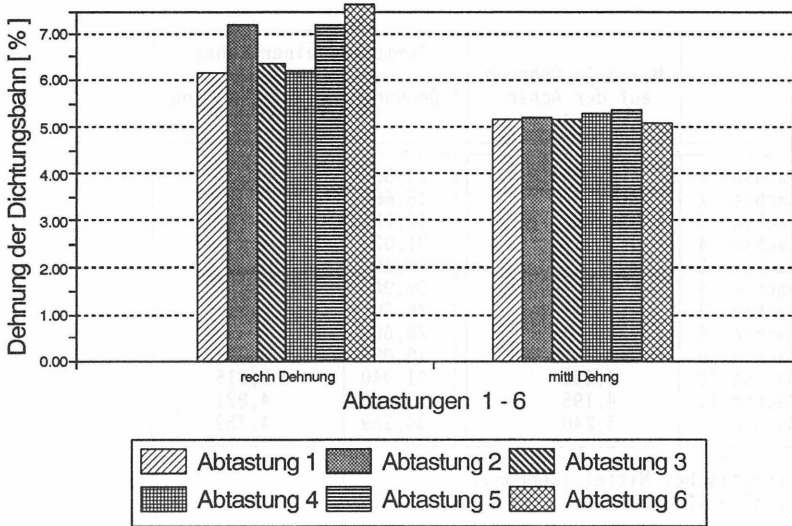


Bild 56.3: Maximale Dehnungen (Probe GEDE2)

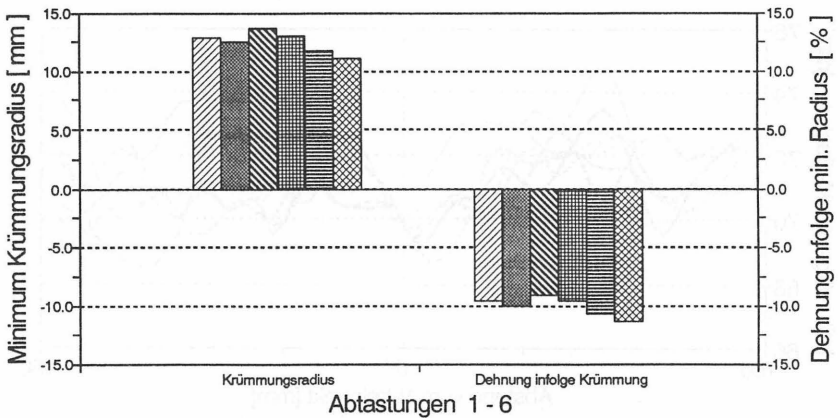


Bild 56.4: Krümmungsradius, Dehnungen infolge Krümmungen (Probe GEDE2)

Die registrierte Verformung der Meßachsen ist in Bild 57.1 beispielhaft für die Achsen 1, 3, 5, 7, 9 und 11 dargestellt. Bild 57.2 zeigt für dieselben Achsen die aus den Vertikalversätzen der benachbarten Punkte berechneten Dehnungen.

	Maximale Dehnung auf der Achse [%]	Summe auf einer Achse	
		Dehnung [%]	Winkeländerung [Grad]
Meßachse 1	4,605	24,886	3,723
Meßachse 2	2,131	18,669	3,326
Meßachse 3	2,984	19,121	3,550
Meßachse 4	3,538	21,027	3,308
Meßachse 5	3,127	29,301	4,151
Meßachse 6	2,004	20,947	3,821
Meßachse 7	2,981	26,692	4,196
Meßachse 8	2,425	28,601	4,293
Meßachse 9	2,338	18,097	3,204
Meßachse 10	2,299	21,940	3,815
Meßachse 11	4,195	36,478	4,821
Meßachse 12	3,240	34,359	4,759
Arithmetisches Mittel (Dehnung) über alle 12 Meßachsen ==>		0,51	

Tabelle 8: Ergebnisse der Abtastung entlang 12 Meßachsen
(Drehung jeweils 15°)

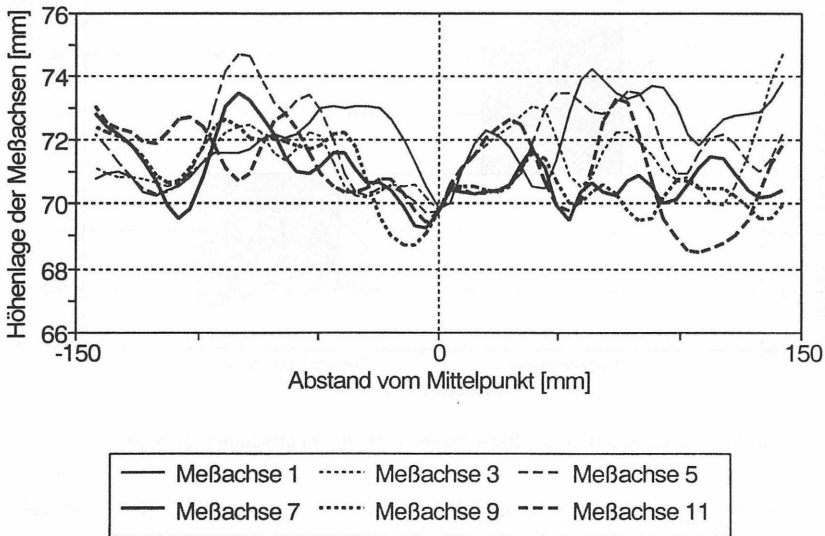


Bild 57.1: Verformung der Dichtungsbahn,
Meßachsen 1, 3, 5, 7, 9, 11 (Probe GEDE2)

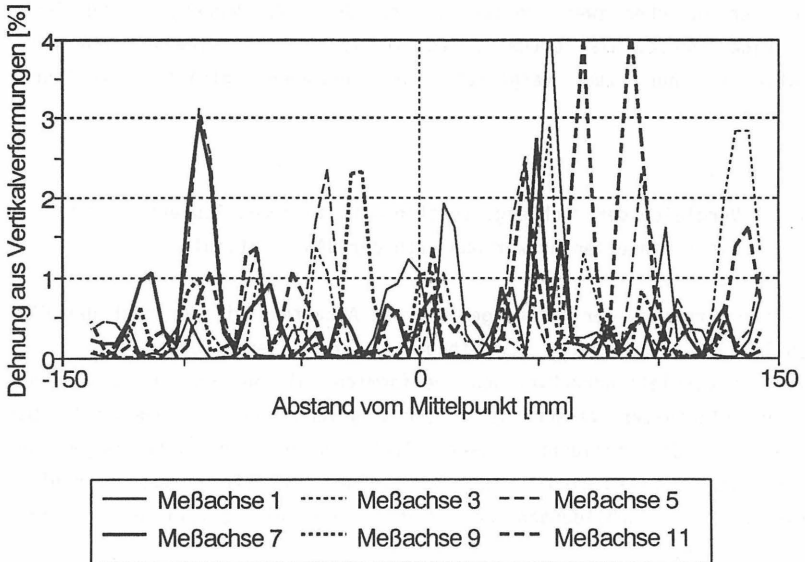


Bild 57.2: Dehnungen der Dichtungsbahn,
Meßachsen 1, 3, 5, 7, 9, 11 (Probe GEDE2)

Ein Vergleich der Werte aus der rasterförmigen Abtastung mit denen aus der Vermessung entlang von Achsen zeigt deutlich die Unterschiede in dem Grad der Genauigkeit. Die Erfassung der am stärksten deformierten Stelle gelingt bei einer Abtastung mit Meßachsen nur zufällig. Die feststellbare maximale Dehnung muß daher in der Regel bei einer nur linienförmigen Erfassung kleiner ausfallen, als bei der flächigen Vermessung.

Die in dem Beispiel für jede Achse registrierte maximale Dehnung ergibt dementsprechend auch Werte zwischen $2,004 \leq \epsilon \leq 4,605 \%$, gegenüber dem bei der flächigen Aufnahme festgestellten Maximalwert von $\epsilon = 7,63 \%$ ($6,16 \leq \epsilon \leq 7,63 \%$).

Die arithmetischen Mittel der Dehnungen aus beiden Erfassungs- und Auswertverfahren lassen sich nicht unmittelbar miteinander vergleichen. Bei der Auswertung des Rasters wird für jeden Punkt jeweils die maximale Dehnung aus den 8 möglichen Verbindungen zu den jeweiligen Nachbarpunkten herausortiert. Da diese Prozedur für jeden Punkt durchgeführt wird, wird

eine sich zwischen zwei Punkten errechnende große Dehnung in der Regel für beide Punkte, also doppelt, registriert. Die Mittelwerte sind daher quantitativ nur zum Vergleich von Versuchen gleicher Verfahren verwendbar.

5.4.5.3 Vergleich der rechnergestützten Abtastung und Auswertung mit einer manuellen Auswertung nach der BAM-Richtlinie

Zu einem Vergleich der rechnergesteuerten Abtastung mit der nach der BAM-Richtlinie empfohlenen Methode der Vermessung der im Zeitstandlastplattendruckversuch verformten Bleche wurden aus einer später erläuterten Versuchsserie sechs Weichbleche herausgesucht. Das Ausmaß der Deformationen dieser Bleche unterschied sich wegen der verwendeten unterschiedlichen Schutzlagen bereits augenscheinlich erheblich. Die Abbildungen der Proben sind als Bilder 58.1 - 58.6 wiedergegeben.

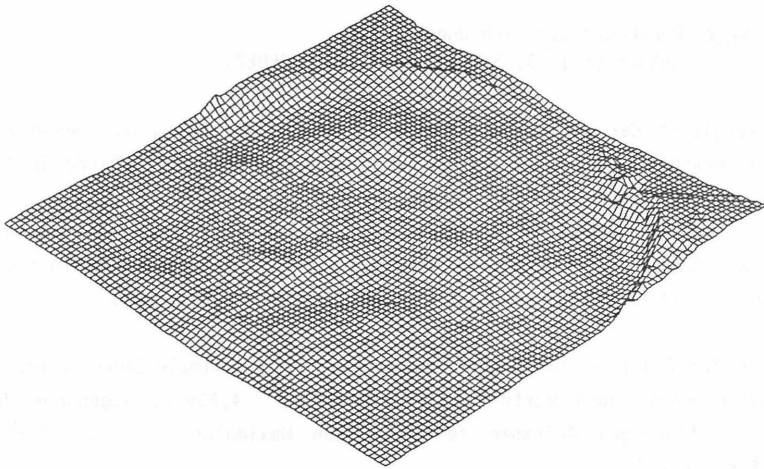


Bild 58.1: Abbildung der Probe GEDA1 (10-fach überhöhte Darstellung)

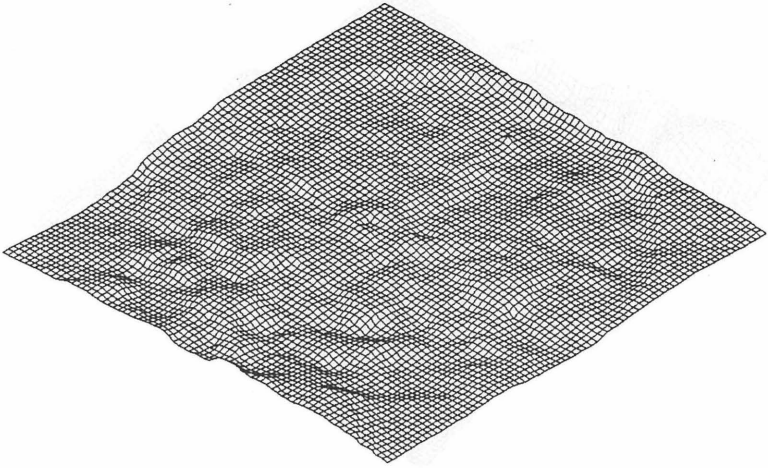


Bild 58.2: Abbildung der Probe GEDB1 (10-fach überhöhte Darstellung)

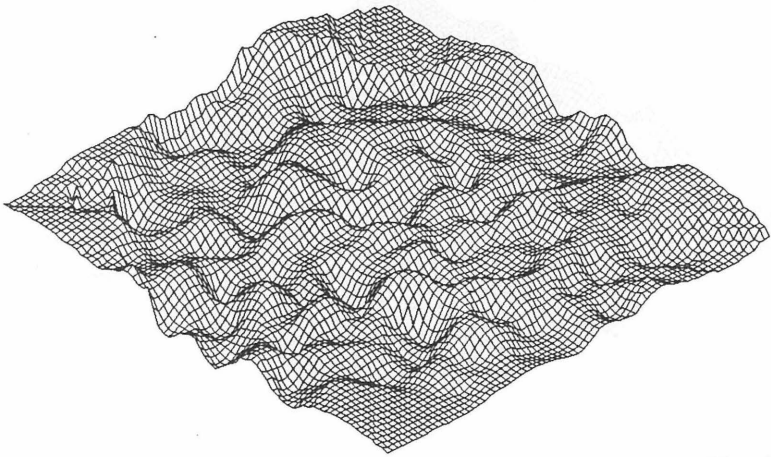


Bild 58.3: Abbildung der Probe GEDC1 (10-fach überhöhte Darstellung)

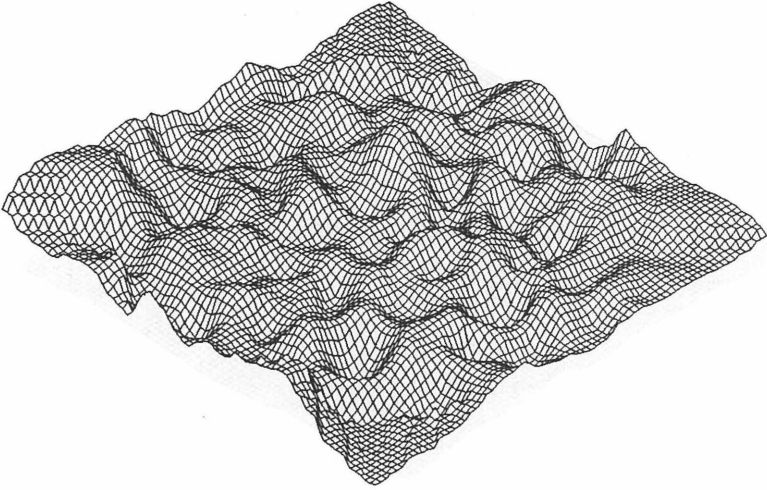


Bild 58.4: Abbildung der Probe GEDD1 (10-fach überhöhte Darstellung)

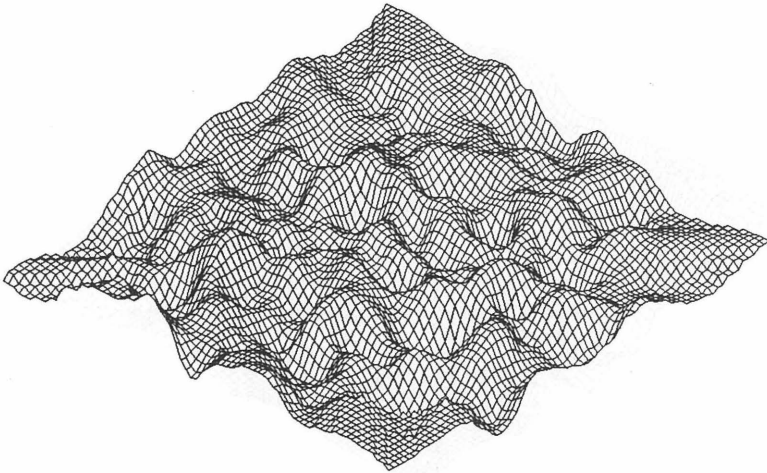


Bild 58.5: Abbildung der Probe GEDE1 (10-fach überhöhte Darstellung)

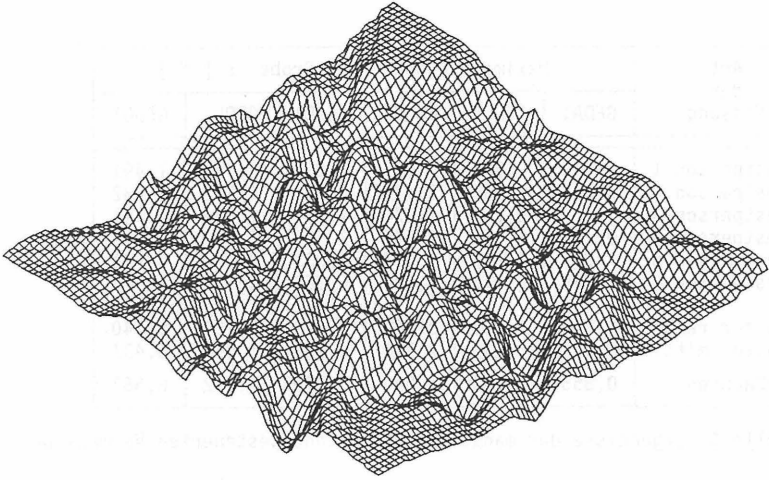


Bild 58.6: Abbildung der Probe GED01 (10-fach überhöhte Darstellung)

Die Proben wurden sechs Mitarbeitern des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik zur Vermessung vorgelegt. Allen Testpersonen wurde das Messverfahren (Abgreifen der Ausdehnung und des Stiches der stärksten Deformation) erläutert und Hilfsmittel nach freier Wahl zur Verfügung gestellt. Bei Unsicherheiten in bezug auf die Wahl der stärksten Verformung wurden alle infrage kommenden Dellen vermessen. Die Auswertung erfolgte, abweichend von den Empfehlungen der BAM (Kugelkalotte), unter der Annahme einer kreisförmigen, einaxialen Verformung (Kreisabschnitt).

Zum Vergleich wurden die Bleche rechnergesteuert mit beiden bereits vorgestellten Verfahren (5 mm Raster, 6 Meßachsen mit 5 mm Intervall) abgefahren. Die aus allen diesen Auswertungen ermittelten Werte für die maximalen Dehnungen sind in Tabelle 9 zusammengefaßt.

Die Ergebnisse der manuellen Messungen sind in Bild 59 graphisch dargestellt. Zum Vergleich wurden die aus der Raster-Abtastung ermittelten Werte der "mittleren Dehnungen" in die Abbildung mit aufgenommen. Bild 60 zeigt eine Gegenüberstellung der "rechnerischen Dehnungen" aus beiden Arten der rechnergesteuerten Abtastung.

Art der Messung	Maximale Dehnung der Probe ϵ [%]					
	GEDA1	GEDB1	GEDC1	GEDD1	GEDE1	GEDO1
Testperson 1	0,120	0,905	7,537	3,285	4,447	11,491
Testperson 2	0,015	1,638	5,474	2,954	4,212	8,332
Testperson 3	0	0,167	2,079	2,047	2,646	10,347
Testperson 4	0,132	1,898	2,646	3,591	5,392	6,693
Testperson 5	0	0,142	1,871	1,333	2,087	3,981
Testperson 6	0,038	0,776	5,147	6,368	8,947	23,925
Raster rechn.	1,240	0,369	3,583	3,029	4,754	9,740
Raster mittl.	0,637	0,263	2,375	2,911	3,315	6,431
Meßachsen	0,855	0,212	2,890	3,3804	4,502	6,567

Tabelle 9: Ergebnisse der manuellen und rechnergesteuerten Vermessung

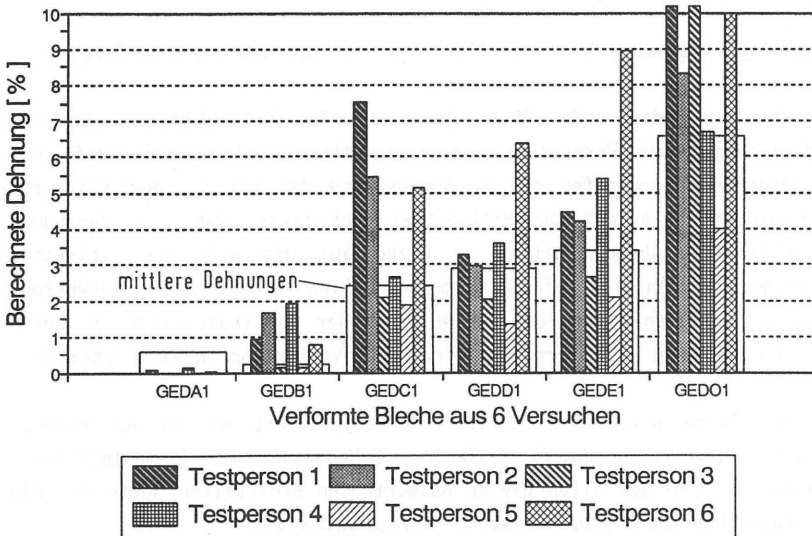


Bild 59: Maximale Dehnungen, Messung verschiedener Testpersonen

Den Darstellungen kann deutlich entnommen werden, mit welchen Unsicherheiten bei der manuellen Auswertung der Zeitstandlastplattendruckversuche gerechnet werden muß. In dem vorgestellten Test sind in den Ergebnissen der verschiedenen Personen Schwankungen von bis zu über 400 % aufgetreten. Die Abweichungen

resultieren aus der subjektiven Wahl der scheinbar stärksten Verformung(en) und den Schwierigkeiten bei der Vermessung der Dellen. Besonders die Ausdehnung, die für das zur Berechnung der Dehnungen anzusetzende Modell einer Kugelkalotte oder eines Kreisabschnittes anzusetzen ist, läßt sich offensichtlich nur sehr schwer zutreffend ermitteln.

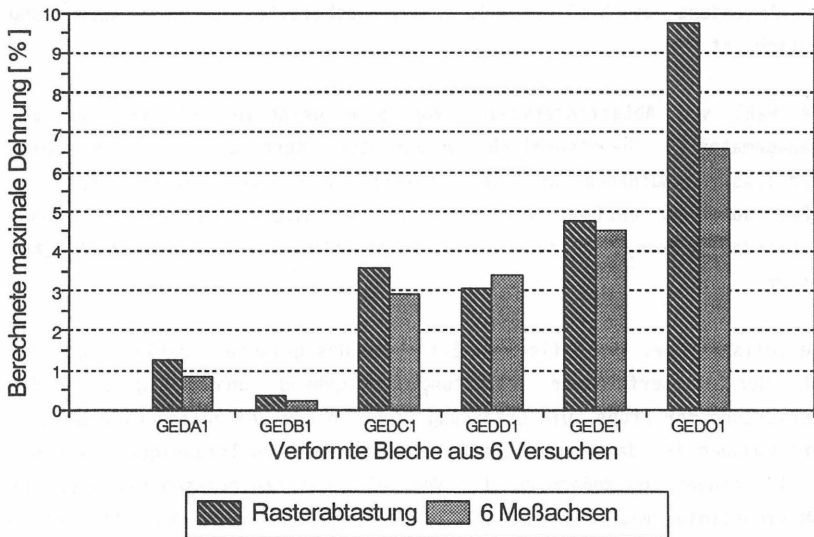


Bild 60: Maximale Dehnungen, rechnergesteuerte Abtastung (Meßachsen- und Rasterabtastung)

Eine bessere Übereinstimmung läßt sich dagegen bei einem Vergleich der maximalen Dehnungen aus den beiden unterschiedlichen, rechnergesteuerten Abtastmethoden erkennen. Die mit den pro Blech jeweils 6 abgetasteten Meßachsen ermittelten maximalen Dehnungen liegen durchweg zwischen den sogenannten "rechnerischen" und "mittleren" Dehnungen, welche sich aus der rasterförmigen Aufnahme ergeben.

5.4.5.4 Zusammenfassende Bewertung

In den vorstehenden Betrachtungen wurden die für die Auswertung der Zeitstandlastplattendruckversuche am Institut für Grundbau und Bodenmechanik entwickelten, rechnergesteuerten Meßverfahren vorgestellt. Über entsprechende Versuche konnte gezeigt werden, daß über die punktuelle Abtastung der verformten Bleche eine mit vorhersehbaren, für die Anwendung unerheblichen Toleranzen behaftete, sichere Auswertung möglich ist.

Die Wahl von Abtastintervallen von 5 mm gewährleistet bei den als Dränagematerial hauptsächlich verwendeten Körnungen 16/32 mm eine zuverlässige Aufnahme der Verformungen. Dies gilt sowohl für die Meßwertaufnahme entlang von sich in der Mitte der runden Proben kreuzenden Achsen, als auch für eine Abtastung in einem quadratischen Raster.

Die vollständige, quasi flächige Erfassung des gesamten Prüflings gelingt mit der rasterförmigen Abtastung weitgehend unabhängig von der Ausrichtung der Probe. Die Erfassung aller in dem Weichblech eingepprägten Verformungen ist dabei naturgemäß genauer - weil vollständiger - als bei der Verwendung von Meßachsen. Ein Vergleich mit Ergebnissen der nach der BAM-Richtlinie möglichen manuellen Vermessung belegt, daß bei einem Einsatz von 6 Meßachsen dennoch Werte geliefert werden können, die der kompletten Erfassung näher kommen, als eine durch die ausführende Person stark beeinflusste manuelle Vermessung. Diese Art der Auswertung stellte sich als vergleichsweise unzuverlässig heraus, da bei der Vermessung von Hand die Resultate in einem hohen Grad von der subjektiven Einschätzung der maßgebenden Verformung abhängig sind.

Für die nachfolgend beschriebenen systematischen Versuche wurden daher ausschließlich die rechnergesteuerten Abtastverfahren und Programme zur Auswertung verwendet. Da die Meßwertaufnahme in einem Raster und das dazugehörige Auswertprogramm erst im Verlauf der Versuchsreihen entwickelt wurden, konnte ein Teil der Proben zu Beginn der Untersuchungen nur durch die linienweise Aufnahme (Meßachsen) ausgewertet werden.

5.5 Einflüsse des Untergrundes

Neben vielen anderen Faktoren haben auch die Eigenschaften des Untergrundes einen Einfluß auf die Ergebnisse der Belastungsversuche in den Drucktöpfen (Zeitstandlastplattendruckversuche). Nach der BAM-Richtlinie kann als Unterlage ein Elastomer definierter Härte (50° Shore-A) verwendet werden. Es wird dabei unterstellt, daß dieser künstliche Untergrund ein ähnliches Verhalten zeigt, wie ein Boden, der als mineralisches Dichtungsmaterial auf der Baustelle Verwendung findet.

Zur Untersuchung des Einflusses der Eigenschaften der Unterlage auf die im Zeitstandlastplattendruckversuch feststellbaren Verformungen der Dichtungsbahn wurde am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig eine spezielle Versuchsreihe in den Drucktöpfen ϕ 300 mm durchgeführt. Diese Versuchsreihe umfaßte je zwei Teilversuche mit insgesamt vier verschiedenen Untergrundmaterialien. Aufgrund der Erfahrungen aus den bereits erwähnten, ähnlich angelegten Vorversuchen, kam für diese Versuchsserie kein fester Belastungsstempel zum Einsatz. Das Dränagematerial (Kies 16/32) wurde statt dessen lose eingeschüttet. Als mineralische Untergrundmaterialien waren zwei Böden einbezogen, die bei konkreten Deponiebaumaßnahmen zur Abdichtung verwendet wurden. Als künstliche Materialien wurde das von der BAM vorgeschlagene Elastomer und eine Styrodurplatte, wie sie bereits von anderen Institutionen bei der Geotextilprüfung eingesetzt worden ist (s. AMPA, Universität Hannover [21]), gewählt.

Die Kornverteilung und das Verdichtungsverhalten der beiden eingesetzten Böden kann Bild 61.1 (Kornverteilung, Ton) und Bild 61.2 (Proctorkurve, Ton), bzw. Bild 62.1 (Kornverteilung, Schluff) und Bild 62.2 (Proctorkurve, Schluff) entnommen werden. Die Materialien wurden wie folgt eingebaut:

- | | |
|--------------------------|---|
| - Ton | Einbauwassergehalt: TON1 w = 30 %,
TON2 w = 34 % |
| - Schluff | Einbauwassergehalt: SCH1 w = 11 %,
SCH2 w = 14 % |
| - Elastomer 50° Shore-A, | $d_{ELA} = 20 \text{ mm}$ |
| - Styrodur 3035 S, | $d_{STY} = 60 \text{ mm}$ |

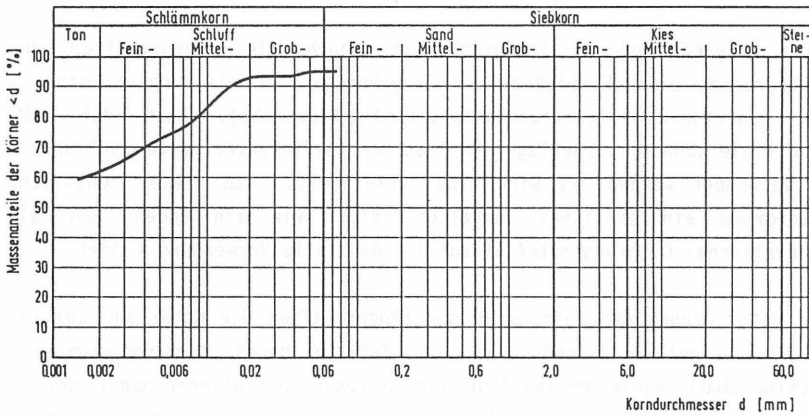


Bild 61.1: Körnungslinie, Ton

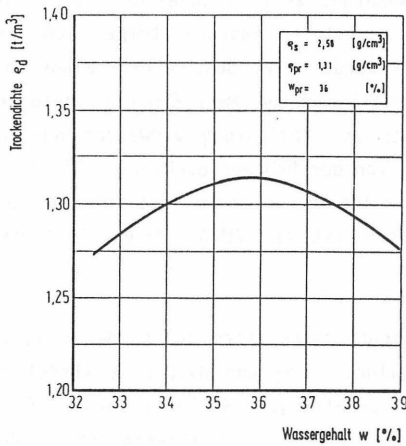


Bild 61.2: Proctorkurve, Ton

Bei allen Versuchen wurde ein Kies der Körnung 16/32 und ein PEHD-Vlies 1.200 g/m² über einer PEHD-Dichtungsbahn, $d_{\text{KDB}} = 2,5$ mm, verwendet. Die eingestellte Prüflast entsprach jeweils einer Spannung von 1 MN/m², bei einer Prüfzeit von 100 Stunden.

Die unter der Dichtungsbahn eingelegten Bleche wurden nach den Versuchen über 6 Meßachsen mit einem Meßintervall von 5 mm abgetastet. Die aus den festgestellten Verformungen berechneten Dehnungen sind für die einzelnen Teilversuche in den Bildern 63.1 – 66.2 dargestellt.

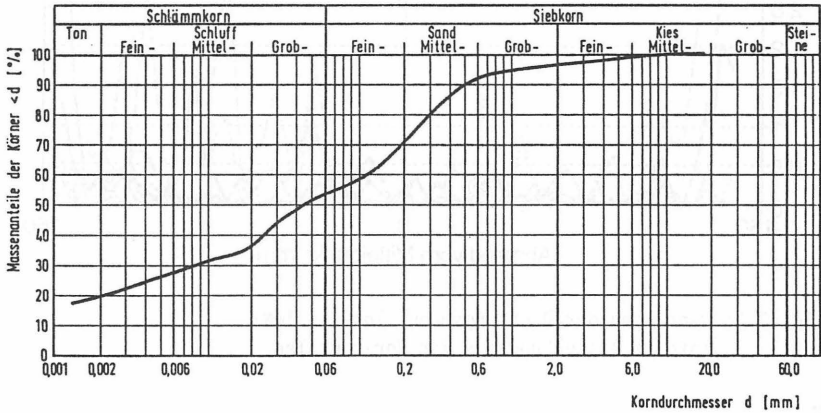


Bild 62.1: Körnungslinie, Schluff

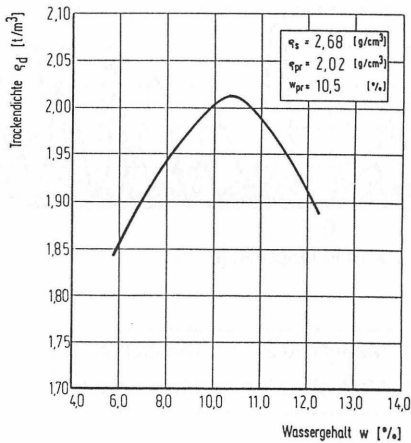


Bild 62.2: Proctorkurve, Schluff

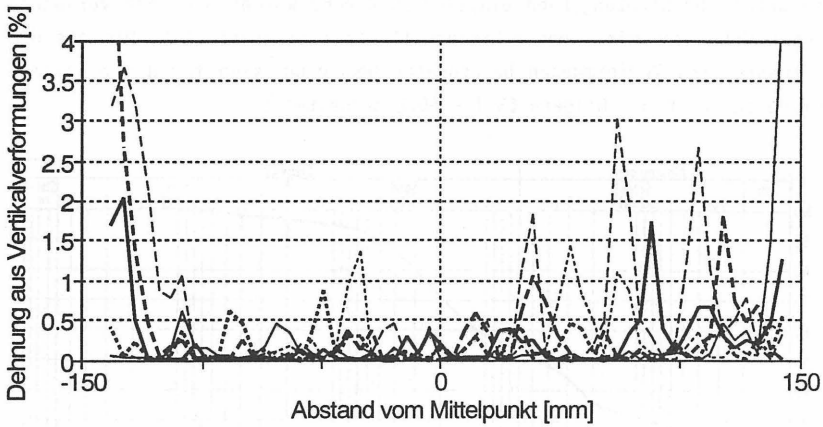


Bild 63.1: Dehnungen der Dichtungsbahn, Ton ==> TON1
infolge Auslenkung aus der Horizontalen

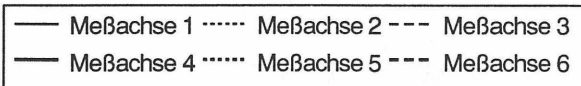
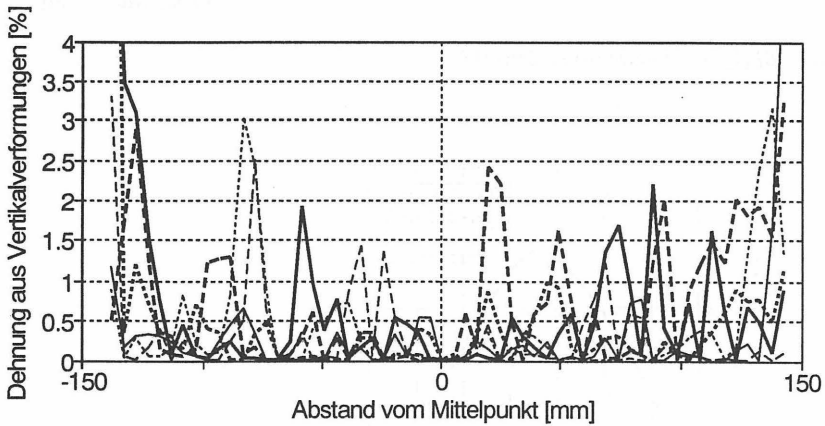


Bild 63.2: Dehnungen der Dichtungsbahn, Ton ==> TON2
infolge Auslenkung aus der Horizontalen

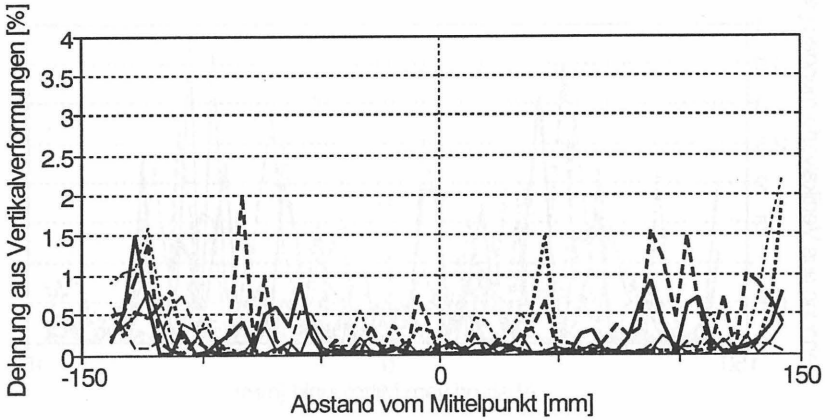


Bild 64.1: Dehnungen der Dichtungsbahn, Schluff ==> SCH1
infolge Auslenkung aus der Horizontalen

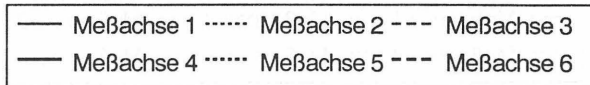
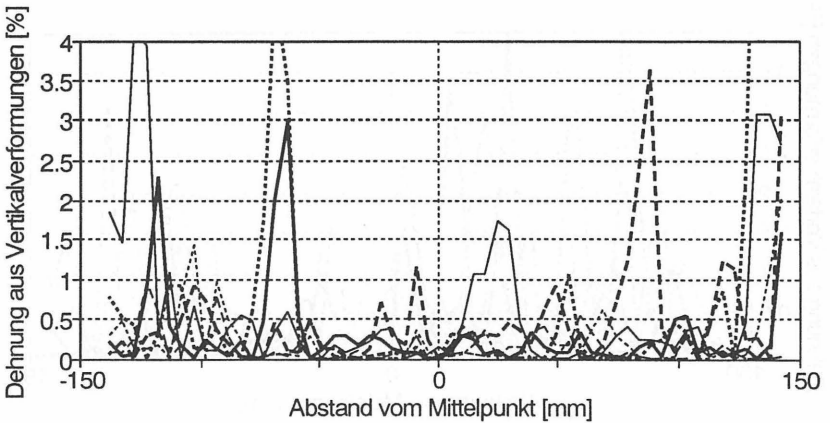


Bild 64.2: Dehnungen der Dichtungsbahn, Schluff ==> SCH2
infolge Auslenkung aus der Horizontalen

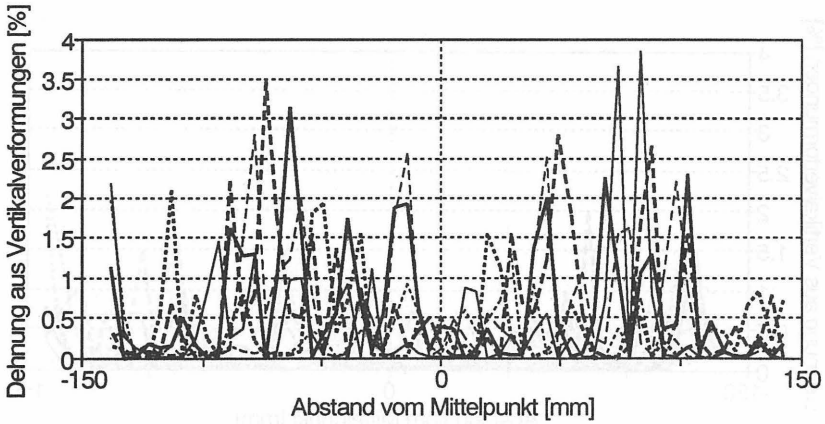


Bild 65.1: Dehnungen der Dichtungsbahn, Elastomer ==> ELA1
infolge Auslenkung aus der Horizontalen

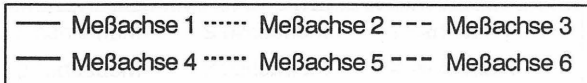
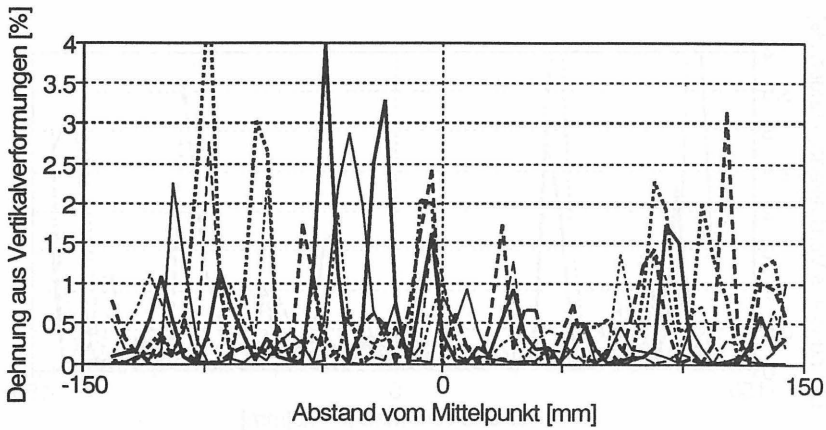


Bild 65.2: Dehnungen der Dichtungsbahn, Elastomer ==> ELA2
infolge Auslenkung aus der Horizontalen

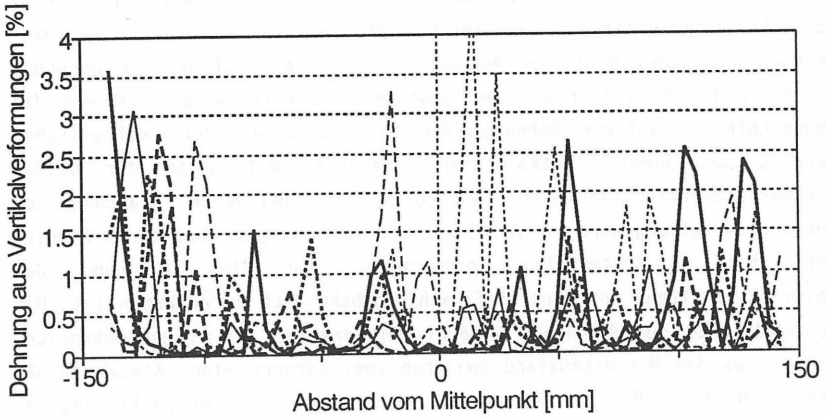
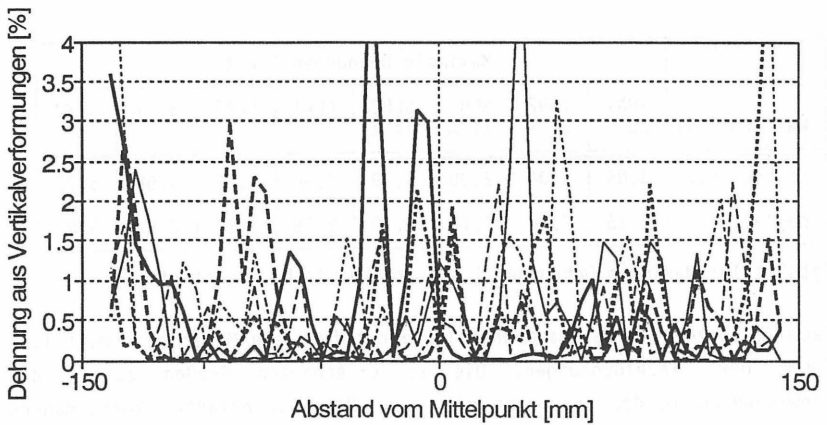


Bild 66.1: Dehnungen der Dichtungsbahn, Styrodur ==> STY1
infolge Auslenkung aus der Horizontalen



— Meßbachse 1	 Meßbachse 2	--- Meßbachse 3
— Meßbachse 4	 Meßbachse 5	--- Meßbachse 6

Bild 66.2: Dehnungen der Dichtungsbahn, Styrodur ==> STY2
infolge Auslenkung aus der Horizontalen

In den Tabellen 10, 11 und 12 sind die Ergebnisse der Auswertungen dieser Versuche zusammengefaßt. Tabelle 10 gibt zwei Werte für die maximale Dehnung aus jedem einzelnen Versuch wieder. Die "rechnerische Dehnung" ergibt sich unmittelbar aus den gemessenen Höhenversätzen, während die sogenannte "geglättete Dehnung" den Mittelwert aus der rechnerischen Dehnung des jeweils betrachteten Intervalls mit denen der beiden Nachbarintervalle darstellt. Mit dieser rechnerischen Glättung der Dehnungsverteilung wird ein Ausgleich der Verformungen über einen Bereich von 15 mm (3 Intervalle) vorgenommen, wie dies aufgrund des Materialverhaltens der Kunststoffdichtungsbahn auch zu erwarten ist. Die Größe des für den Ausgleich angesetzten Bereiches von 15 mm entspricht dabei etwa dem Mindestabstand zwischen zwei Körnern eines Kiesel 16/32, innerhalb dessen Materialbewegungen möglich sind. Bei der Bestimmung der maximalen Dehnungen wurden nur die Werte berücksichtigt, die in einem Abstand ≤ 100 mm um den Mittelpunkt der Probe gemessen wurden, da die Verformungen weiter außen – besonders bei Verwendung eines mineralischen Untergrundes – von Randstörungen beeinflußt sind.

Wassergehalt	Maximale Dehnungen [%]							
	TON1 30 %	TON2 34 %	SCH1 11 %	SCH2 14 %	ELA1	ELA2	STY1	STY2
rechnerisch	3,04	3,04	2,00	4,79	3,86	4,61	4,68	5,87
geglättet	2,15	2,34	1,16	3,70	2,38	3,20	2,92	3,87

Tabelle 10: Maximale Dehnungen [%] (rechnerisch, geglättet)

Tabelle 11 zeigt eine Zusammenstellung der für jede Meßachse ermittelten Summe der Einzeldehnungen. Die so errechneten Größen zeigen die Schwankungen in den insgesamt mit jeder Meßachse erfaßten Verformungen als Maß dafür, wie aussagekräftig die Erfassung eines Schnittes ist. Die ebenfalls in der Tabelle 11 aufgeführten Summen der Gesamtdehnungen aller für jeden Versuch abgetasteten 6 Meßachsen gestatten einen Vergleich der Parallelversuche untereinander.

Als Maß für die Unebenheit der Bleche wurden aus den erfaßten Meßwerten die für jeden Punkt errechenbare Winkeländerung des Polygonzuges ermittelt und zur weiteren Auswertung entlang einer jeden Meßachse

aufsummiert. Die Winkeländerungen der in dieser Versuchsserie aufgenommenen Proben sind in den Bildern 67.1 - 70.2 wiedergegeben. Die statistische Auswertung der Winkeländerungen ist in der Tabelle 12 zusammengestellt.

Wassergehalt	Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%]							
	TON1 30 %	TON2 34 %	SCH1 11 %	SCH2 14 %	ELA1	ELA2	STY1	STY2
Meßachse 1	3,3	7,2	3,5	12,9	22,0	15,6	8,9	24,5
Meßachse 2	10,0	12,6	4,9	5,7	11,2	18,6	27,5	26,0
Meßachse 3	13,6	14,1	3,1	4,9	31,3	12,6	17,2	19,8
Meßachse 4	6,0	16,2	7,0	11,4	30,8	26,8	13,6	26,3
Meßachse 5	6,7	9,5	4,4	16,1	15,6	28,1	12,6	22,8
Meßachse 6	6,8	20,2	11,8	18,6	30,4	20,4	8,0	19,7
Summe	46,4	80,0	34,7	69,7	141,4	122,2	87,9	139,2
Mittelwert	7,7	13,3	5,8	11,6	23,6	20,4	14,6	23,2
Standwgs	3,58	4,66	3,25	5,49	8,69	6,12	7,13	2,94
Variabk V %	46,52	35,07	56,02	47,32	36,83	30,01	48,84	12,66

Tabelle 11: Summe der Dehnungen jeder Meßachse [%]

Wassergehalt	Summe der Winkeländerungen über jede Meßachse [Grad]							
	TON1 30 %	TON2 34 %	SCH1 11 %	SCH2 14 %	ELA1	ELA2	STY1	STY2
Meßachse 1	1,39	1,91	1,44	2,71	3,19	2,71	2,20	3,46
Meßachse 2	2,06	2,28	1,61	1,67	2,54	3,39	3,58	3,87
Meßachse 3	2,52	2,63	1,24	1,59	4,23	2,45	3,02	3,45
Meßachse 4	1,61	2,87	1,86	2,44	4,15	3,78	2,46	3,33
Meßachse 5	1,93	2,30	1,35	2,45	2,80	3,66	2,65	3,59
Meßachse 6	1,78	3,15	2,39	3,22	4,02	3,34	2,00	3,25
Summe	11,29	15,12	9,89	14,07	20,94	19,32	15,90	20,94
Mittelwert	1,88	2,52	1,65	2,34	3,49	3,22	2,65	3,49
Standwgs	0,39	0,45	0,42	0,62	0,74	0,53	0,58	0,22
Variabk V %	20,74	17,83	25,65	26,65	21,18	16,45	21,76	6,28

Tabelle 12: Summe der Winkeländerungen für jede Meßachse [Grad]

Aus den in den Tabellen zusammengefaßten Ergebnissen läßt sich herauslesen, daß die spezifischen mechanischen Eigenschaften des Untergrundes einen mit den eingesetzten Mitteln deutlich feststellbaren Einfluß auf die Verformungen der Dichtungsbahn haben. Die ermittelten maximalen Dehnungen lagen bei den Versuchen mit einem mineralischen Untergrund im Mittel unter denen mit künstlichem Untergrund. Styrodur

erweist sich in diesen Versuchen als die Unterlage, auf welcher die Dichtungsbahn am stärksten verformt wird. Demgegenüber wurden bei Verwendung der Elastomer-Unterlage etwa um 1 % geringere maximale Dehnungen festgestellt.

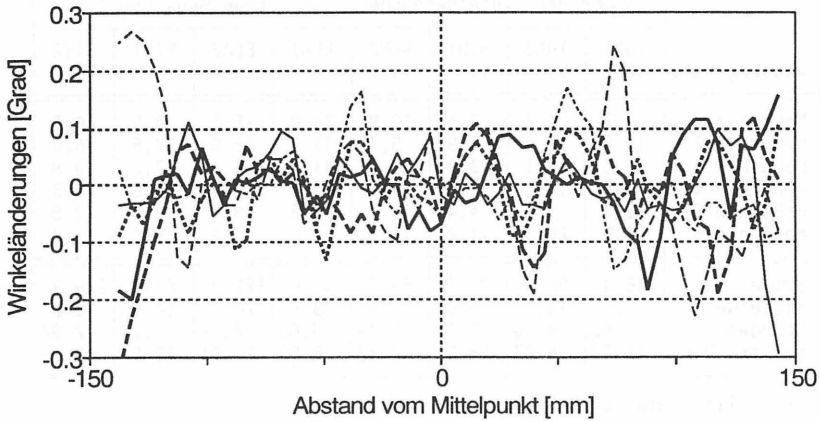


Bild 67.1: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Ton ==> TON1

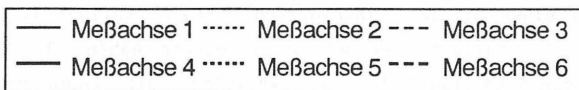
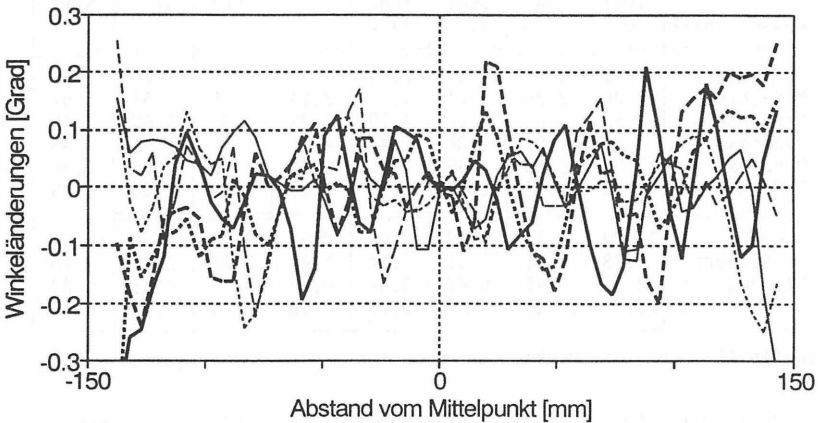


Bild 67.2: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Ton ==> TON2

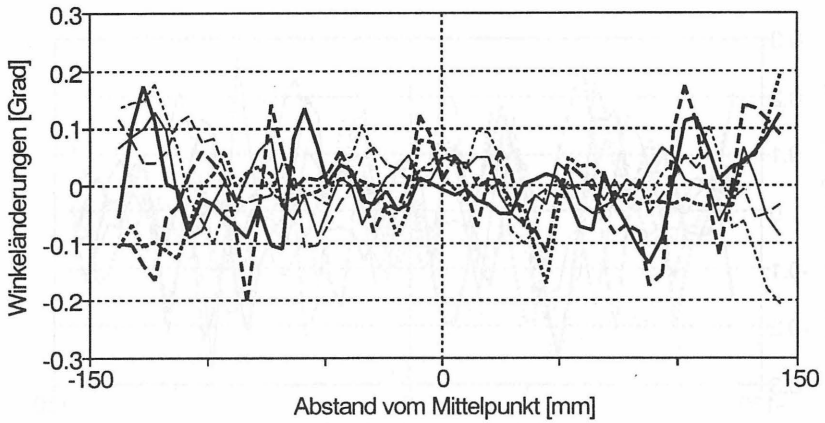


Bild 68.1: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Schluff ==> SCH1

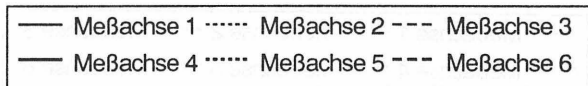
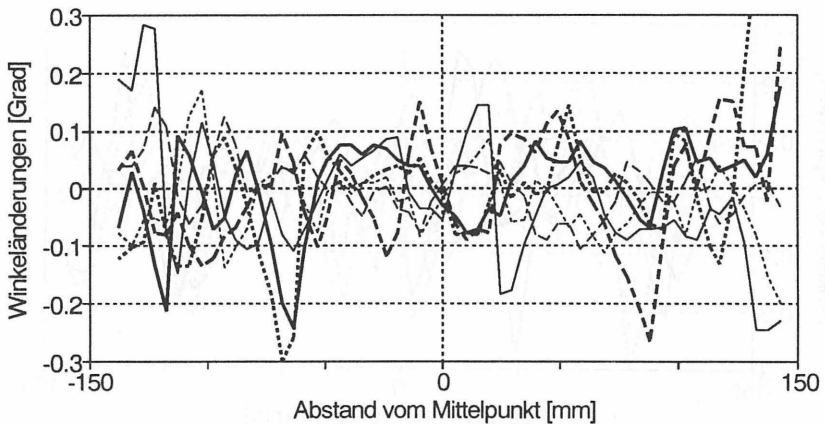


Bild 68.2: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Schluff ==> SCH2

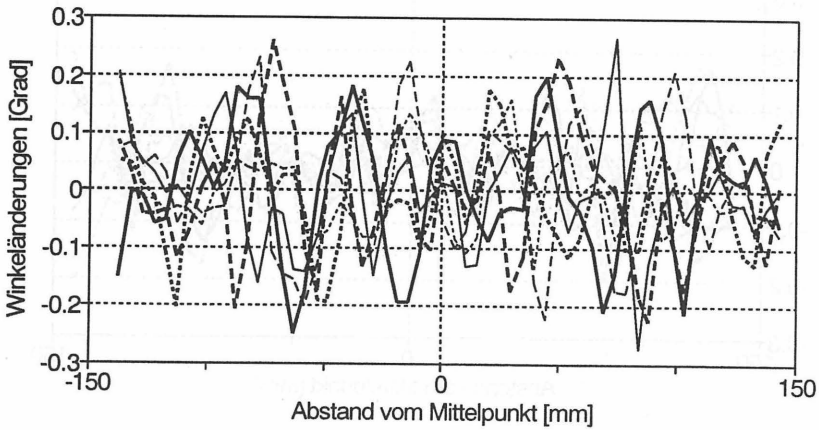
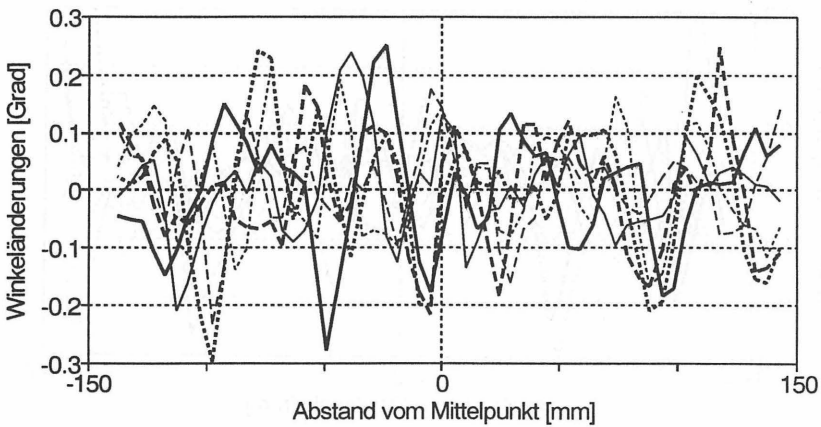


Bild 69.1: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Elastomer ==> ELA1



— Meßachse 1	 Meßachse 2	--- Meßachse 3
— Meßachse 4	 Meßachse 5	--- Meßachse 6

Bild 69.2: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Elastomer ==> ELA2

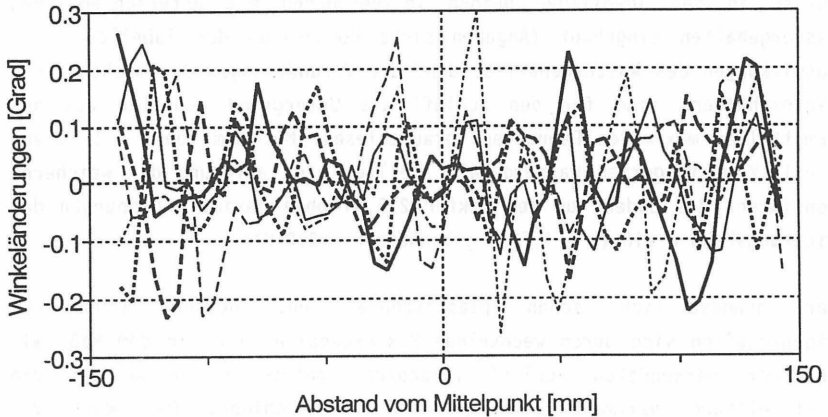


Bild 70.1: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Styrodur ==> STY1

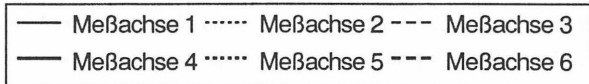
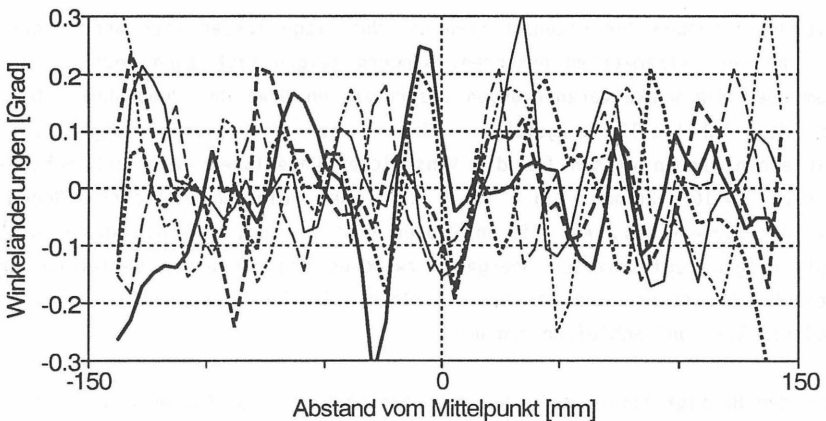


Bild 70.2: Winkeländerung entlang der Meßachsen, Styrodur ==> STY2

Als vergleichsweise "schonende" Unterlagen stellen sich die natürlichen Böden heraus, welche anhand der Ergebnisse aber auch untereinander noch einmal unterschieden werden können. Sowohl der Ton als auch der Schluff

wurden in den jeweiligen beiden Teilversuchen mit unterschiedlichen Wassergehalten eingebaut (Angaben siehe Kopfzeilen der Tabellen). Die Auswirkungen des Wassergehaltes, d.h. die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, sind für den Schluff als Untergrund deutlich aus den ermittelten maximalen Dehnungen herauszulesen. Mit dem von $w = 11\%$ auf $w = 14\%$ gesteigerten Wassergehalt stellten sich aufgrund der weicheren Konsistenz des Bodens um den Faktor 2,5 erhöhte maximale Dehnungen der Dichtungsbahn ϵ ein ($\epsilon = 4,79\%$ gegenüber $\epsilon = 2,0\%$).

Der grundsätzlich schon plastischere Ton, dessen mechanische Eigenschaften sich durch wechselnde Wassergehalte nicht in dem Maße wie bei dem verwendeten Schluff verändern, zeigte in bezug auf die feststellbare maximale Dehnung keine Unterschiede. Der Wert von $\epsilon = 3,04\%$ liegt zwischen den beiden für den Schluff ermittelten Größen und unterhalb der für die künstlichen Unterlagen errechneten Werte.

Die Auswirkungen der Eigenschaften der Unterlage lassen sich aber nicht nur an den Extremwerten erkennen, sondern zeigen sich auch deutlich in dem über die Winkelveränderungen ausdrückbaren Grad der Unebenheit. Die in der Tabelle 12 aufgeführten Summen der Winkelveränderungen der einzelnen Proben weisen für die künstlichen Unterlagen erheblich höhere Werte ($\approx 16 < \text{Summe} < 21$) aus, als für die natürlichen Böden ($\approx 10 < \text{Summe} < 15$). Aus diesen Größen geht hervor, daß die durch die Abtastungen registrierten Übergänge zwischen den einzelnen Verformungen bei der Elastomer- und Styrodurunterlage schärfer ausgeprägt sind, als bei dem Ton- und Schluffuntergrund.

Aus den Häufigkeitsverteilungen der Dehnungen infolge Auslenkung aus der Horizontalen ϵ und der aus den Krümmungen berechneten Dehnungen der Randfaser ϵ_r läßt sich ebenfalls eine Verschiebung zu den größeren Verformungen bei den Versuchen mit den künstlichen Unterlagen ablesen. Die als Bild 71.1 (Dehnungen des gesamten Querschnittes ϵ) und Bild 71.2 (Dehnungen der Randfaser ϵ_r) wiedergegebenen Häufigkeitsverteilungen zeigen weiter die zwischen den einzelnen Meßachsen feststellbare Streuung der Ergebnisse. Für die Wiedergabe wurden beispielhaft die Darstellungen der Versuche herausgesucht, welche die größte (SCH2), bzw. die kleinste Streuung (STY2) in den Resultaten für die einzelnen Meßachsen ergaben.

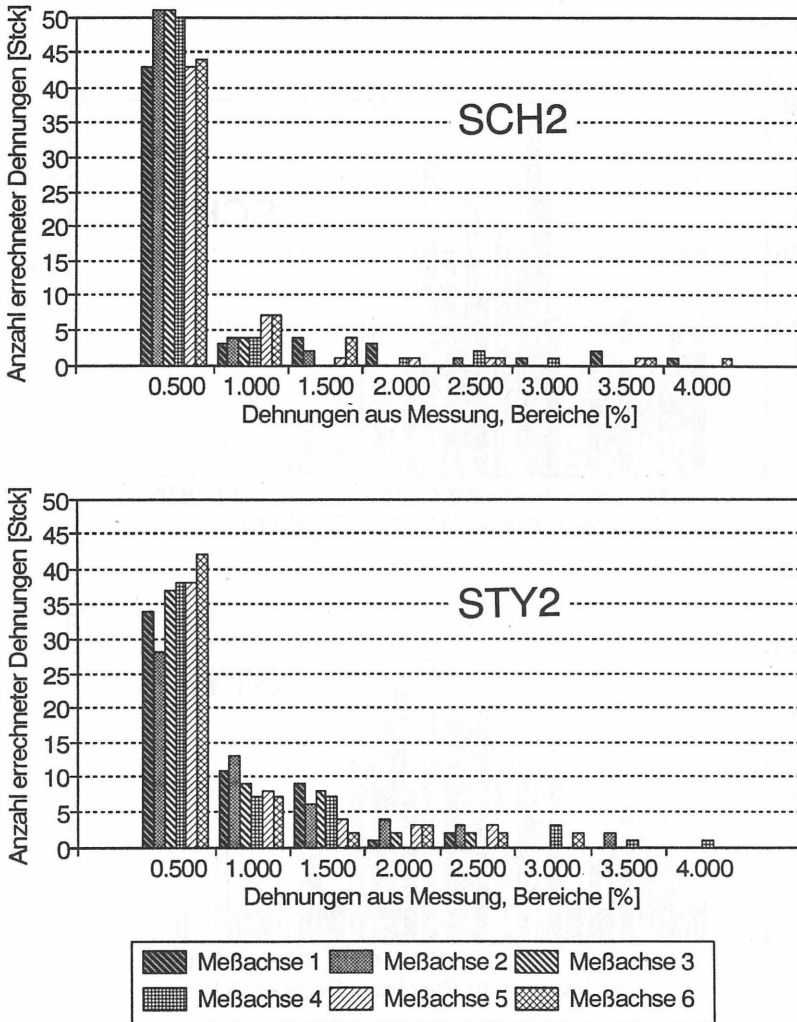


Bild 71.1: Häufigkeitsverteilung, Dehnung ϵ des gesamten Querschnittes dargestellte Versuche: SCH2 und STY2

Solche auch aus den Grafiken (Bild 67.1 – Bild 70.2) zu ersiehenden Unterschiede sind visuell selbst qualitativ praktisch nicht feststellbar.

Erst die Auswertung der rechnergesteuerten Meßwertaufnahme macht diese Effekte sichtbar und liefert Werte, die einen direkten Vergleich zulassen.

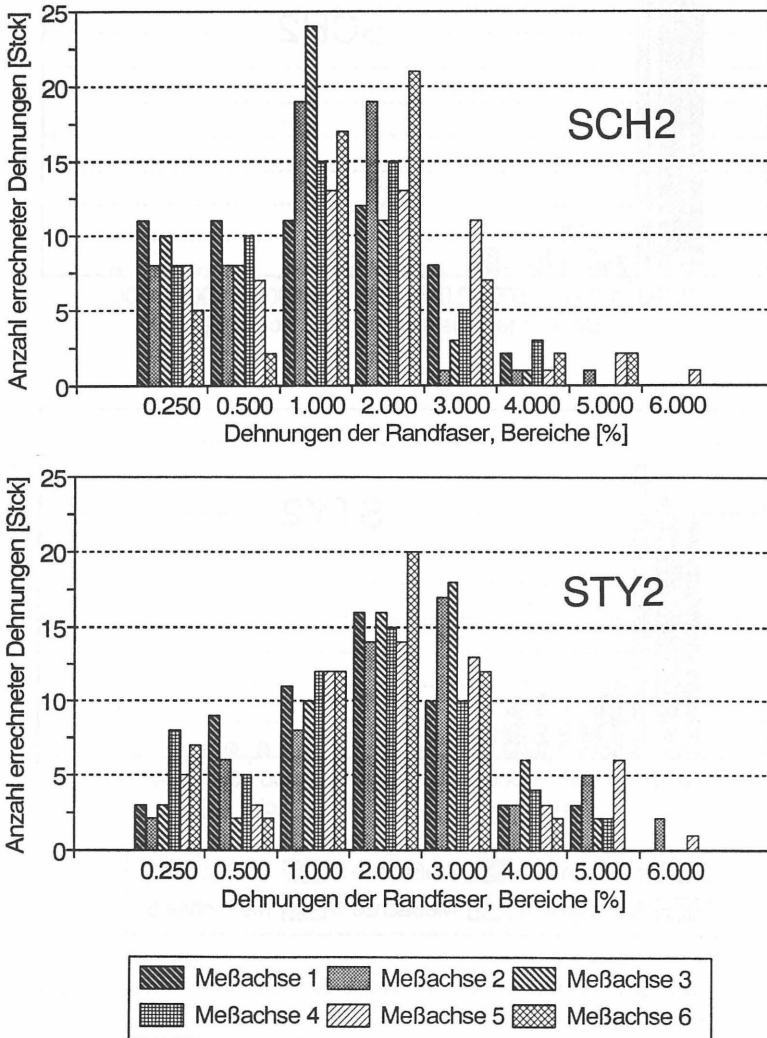


Bild 71.2: Häufigkeitsverteilung, Dehnung der Randfaser ϵ_r
dargestellte Versuche: SCH2 und STY2

Die unterschiedliche Wirkung der Unterlagen läßt sich dadurch erklären, daß bei einem mineralischen Untergrund durch eine schnelle, ungleichförmige (hier: punktförmige) Belastung eine zunächst weitgehend volumentreue Materialverlagerung in weniger belastete Nachbarbereiche stattfindet. Auf diese Weise - im Zusammenwirken mit der den Boden abdeckenden Dichtungsbahn - erzeugte Verspannungen führen zu einer Vergrößerung des für den Lastabtrag wirksamen Bereiches und somit zu einer Vergleichmäßigung der Verformungen. Anders bei der Elastomerunterlage, bei welcher der Lastabtrag kleinräumiger verläuft. Durch dieses Verhalten können sich die Einzelkörner schärfer eindrücken, was an den bei den verwendeten Elastomer- und Styrodurunterlagen über die Meßachsen deutlich schärferen Winkeländerungen - als Maß für die Bewegung der Oberfläche - als bei einem mineralischen Untergrund ablesbar ist.

Für vergleichende Versuche bieten die künstlichen Unterlagen wegen der immer gleichmäßigen Eigenschaften allerdings einige Vorteile gegenüber den Böden. Der Einsatz künstlicher Unterlagen gewährleistet immer gleiche Auflagerbedingungen sowohl in bezug auf die Eigenschaften über die Prüffläche, als auch im Hinblick auf die einzelnen Versuche einer Serie untereinander. Inwieweit sich jedoch die mit künstlichen Unterlagen produzierten Ergebnisse auf die Verhältnisse mit natürlichen Böden übertragen lassen, ist noch durch weitere, entsprechend angelegte Untersuchungen zu klären. Je nach der Höhe der aufzubringenden Prüflasten könnte sich der Einfluß der Unterlagen unterschiedlich darstellen, da eine Materialverdrängung (Bruch) bei einem natürlichen Boden erst ab einer bestimmten, materialspezifischen Belastung einsetzt.

Daß sich die beiden in der beschriebenen Versuchsreihe benutzten künstlichen Materialien (Elastomer und Styrodur) für vergleichende Untersuchungen eignen, läßt sich anhand der in den Tabellen 10 - 12 mit aufgeführten Variabilitätskoeffizienten $V\%$ belegen. Über diesen Variabilitätskoeffizienten läßt sich die Variabilität unterschiedlich großer Objekte miteinander vergleichen [27].

Ein Vergleich des Variabilitätskoeffizienten $V\%$ für die Dehnungen wie für die Winkelveränderungen zeigt, daß die Ergebnisse der jeweiligen Parallelversuche bei Verwendung der künstlichen Unterlagen eine geringere Streuung - ausgedrückt durch den Betrag von $V\%$ - aufweisen als die bei

Einsatz eines mineralischen Untergrundes. Der Unterschied wird noch deutlicher, wenn sämtliche Meßwerte der Achsen in die Auswertung einbezogen werden, statt – wie für die bisherigen Betrachtungen geschehen – nur die bis zu einem Abstand von 100 mm zum Probenmittelpunkt.

Die Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Versuchsserie unter Berücksichtigung aller Werte der über eine Länge von 290 mm aufgenommenen (Abstand von 145 mm zum Probenmittelpunkt) Meßpunkte.

	TON1	TON2	SCH1	SCH2	ELA1	ELA2	STY1	STY2
Dehnungen über jede Meßachse [%]								
Summe	106,1	173,4	76,2	150,3	169,2	162,5	157,3	229,9
Mittelwert	17,7	28,9	12,7	25,0	28,2	27,1	26,2	38,3
Standwg s	9,9	10,4	5,6	10,7	8,64	8,3	6,0	8,8
Variabk V %	55,7	36,0	44,0	42,7	30,6	30,7	23,0	23,0
Winkeländerungen über jede Meßachse [Grad]								
Summe	19,63	25,75	17,59	23,50	26,73	26,59	25,39	31,07
Mittelwert	3,27	4,29	2,93	3,92	4,46	4,43	4,23	5,18
Standwg s	0,87	0,83	0,67	1,12	0,79	0,78	0,51	0,61
Variabk V %	26,6	19,3	22,9	28,6	17,7	17,6	12,1	11,8

Tabelle 13: Statistische Auswertung unter Berücksichtigung aller Werte jeder Meßachse (ϕ 290 mm), Auswertung der Dehnungen und Winkelveränderungen

Die Zusammenstellung zeigt nicht nur die wesentlich kleineren Werte des Variabilitätskoeffizienten V % für die künstlichen Unterlagen sondern darüber hinaus auch noch die hohe Übereinstimmung dieser Werte für die beiden jeweiligen Parallelversuche. Randstörungen treten bei den Versuchen mit den künstlichen Unterlagen wegen der insgesamt wesentlich geringeren möglichen Setzungen nicht in dem Maße auf, wie bei denen mit natürlichen Böden, so daß die Auswertung auf einer breiteren Datenbasis (hier: Berücksichtigung aller Werte der Meßachsen) für die Versuche mit Elastomer und Styrodur eine Verbesserung der Aussage bringt. Bei der Auswertung der Versuche mit Ton und Schluff wirkt sich die Berücksichtigung aller Meßwerte dagegen nachteilig aus, was dafür spricht, die Auswertung auf den mittleren Bereich der Proben zu beschränken.

5.6 Reproduktionsversuche

5.6.1 Versuchsdurchführung und Ziele der Versuchsreihe

Die Qualität eines Versuches kann daran beurteilt werden, wie gut die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist. Gerade bei einem Versuch, der dem experimentellen Nachweis der Eignung eines Produktes dienen soll, ist es unbedingt erforderlich, daß das Resultat nicht - oder nur in einem einschätzbaren Maß - von irgendwelchen Zufälligkeiten bei der Ausführung und/oder Ungenauigkeiten der Apparatur beeinflusst wird. Dies ist um so wichtiger, je geringer die für die Führung des Nachweises geforderte Zahl der Einzelversuche ist.

Die nachfolgend beschriebene Versuchsserie diene im wesentlichen der Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des Zeitstandlast-plattendruckversuches. Dazu wurden insgesamt vier verschiedene Versuchskonstellationen für jeweils fünf Teilversuche gewählt: Bei Verwendung von zwei verschiedenen geotextilen Schutzschichten (Geotextil A und B) wurden je fünf Teilversuche unter möglichst genau gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Beide geotextile Schutzlagen waren Verbundstoffe (Vlies + Gewebe) mit einem Flächengewicht von 2.000 g/m^2 . Geotextil A war aus PP und Geotextil B aus PEHD gefertigt. Als Untergrund wurde zum einen ein natürlicher Boden (Schluff) verwendet, zum anderen diente ein Elastomer als Unterlage. Die Versuchsmatrix ist in Bild 72 dargestellt. In dieser Grafik sind neben den Angaben zu Versuchsdurchführung auch die Bezeichnungen der einzelnen Teilversuche aufgenommen.

Der verwendete Boden (Schluff) wurde, ebenso wie das eingesetzte Elastomer, bereits in Abschnitt 5.5 näher beschrieben.

Bei allen Versuchen wurde angestrebt, möglichst gleiche Belastungssituationen zu erzeugen, so daß die Unterschiede in den Verformungen der einzelnen Teilversuche einer Schutzlagen/Untergrund-Konstellation nur aus der nicht beeinflussten, zufälligen Kornanordnung des lose eingeschütteten Kiesel (16/32) herrühren können.

Neben der Untersuchung der Reproduzierbarkeit sollten die Versuche noch zur Klärung einiger anderer Aspekte dienen. So zeigt ein Vergleich der Ergebnisse aus den Parallelversuchen mit den beiden eingesetzten Schutzlagen die Sensibilität des Versuches (Ausführung und Auswertung) in bezug auf die Wirkung der unterschiedlichen Geotextilien. Desweiteren können Effekte aufgrund der Verschiedenartigkeiten der beiden Unterlagen betrachtet werden. Die Auswertung aller Versuche gestattet darüber hinaus eine Abschätzung, inwieweit störende Randeinflüsse die Ergebnisse verfälschen und ob die zur Verfügung stehende Größe der Prüffläche für die verwendete Kieskörnung überhaupt als ausreichend angesehen werden kann.

5.6.2 Darstellung der Ergebnisse

5.6.2.1 Größe der auszuwertenden Fläche

Die nach den Belastungsversuchen ausgebauten Bleche zeigen häufig in den Randbereichen heftigere Verformungen als über die restliche, innere Fläche. Die Ursache für diese Erscheinung ist in den Verspannungen innerhalb des Kiesel zu suchen, durch welche die Einzelkörner an der starren Berandung des Topfes in ihrer Bewegung blockiert sind und so zu einem gestörten Lastabtrag führen. Diese Störungen können sich durch eine verstärkte Belastung von Einzelkörnern mit entsprechenden registrierbaren Verformungen zeigen, machen sich unter Umständen aber auch – wenn sich Körner durch hohe Verspannungen an der Wandung aufhängen – durch vergleichsweise geringere Deformationen bemerkbar.

Das Ausmaß und die Reichweite dieser Randeinflüsse ist um so größer, je mehr Bewegungen durch Setzungen des Untergrundes einsetzen können. Bei Verwendung eines Bodens treten diese verfälschenden Effekte daher wesentlich deutlicher zutage, als bei Einsatz der vergleichsweise dünnen Elastomer-Unterlage. Durch den Einbau eines umlaufenden reibungsabmindernden Vlieses lassen sich derartige Störungen zwar deutlich reduzieren, ganz zu vermeiden sind sie allerdings nicht.

Anhand der Ergebnisse der mit einem Elastomer durchgeführten Reproduktionsversuche sollten die Reichweite der Randeinflüsse festgestellt

werden, um in den weiteren Untersuchungen die beeinflussten Randbereiche bei der Bewertung aussparen zu können. Grundlage für die im folgenden dargestellten Betrachtungen sind die Meßwerte aus rasterförmigen Abtastungen der Bleche. Als Meßintervall wurde bei dieser Form der Oberflächenaufnahme durchgehend ein Abstand von 5 mm eingestellt. Da diese Möglichkeit der Meßwerterfassung erst im Laufe der Versuchsreihe entwickelt worden ist, konnten die zuerst mit dem Schluff-Untergrund durchgeführten Versuche nur mit der zu diesem Zeitpunkt bereits einsatzfähigen Achsen-Abtastung aufgenommen werden. Eine systematische Auswertung dieser Meßachsen im Hinblick auf die Erfassung der Randstörungen wurde nicht vorgenommen, da alle weiteren Zeitstandlastplattendruckversuche - entsprechend der BAM-Richtlinie - auf einem Elastomer durchgeführt wurden.

Zur Untersuchung, wie weit der Einfluß der Randeinflüsse feststellbar ist, wurden die Datensätze der Raster-Abtastung aller "Elastomer-Versuche" in der in Abschnitt 5.4.4 beschriebenen Weise ausgewertet. Jeder Datensatz wurde dabei jeweils nur unter Berücksichtigung der in einem Radius von 80/90/100/110/120/130/140/150 mm zum Mittelpunkt der Probe befindlichen Meßpunkte betrachtet.

Die auf diese Weise errechneten Variationskoeffizienten für verschiedene Parameter geben die Veränderung der Streuung dieser betrachteten Größen mit der Erfassung von Meßpunkten bis zu einer immer größeren Entfernung zum Mittelpunkt der Probe wieder. Bei einer ohne Störungen belasteten Fläche müßte sich eine für die Belastungskonstellation typische Streuung einstellen. Ein Anwachsen dieser Streuung beschreibenden Variationskoeffizienten ab einem bestimmten Radius des berücksichtigten Bereiches würde den Beginn, bzw. die Reichweite der Randstörungen anzeigen.

In den Bildern 73.1 und 73.2 sind die Variationskoeffizienten für die Versuche mit der Schutzlage A (Bild 73.1) und der Schutzlage B (Bild 73.2) unter Berücksichtigung der verschiedenen Radien (erfaßter maximaler Abstand zum Mittelpunkt) bei Auswertung der rechnerischen Dehnungen dargestellt. Die Bilder 74.1 (Schutzlage A) und 74.2 (Schutzlage B) zeigen die gleichen Zusammenhänge bei Auswertung der berechneten Krümmungsradien.

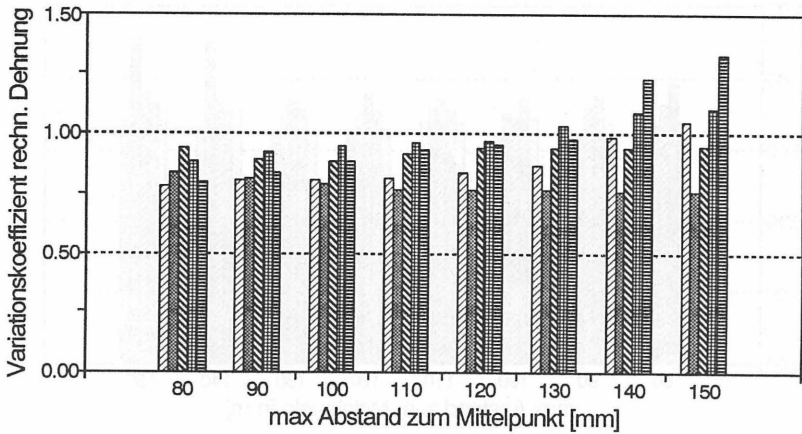


Bild 73.1: Variationskoeffizient der rechnerischen Dehnungen
(Schutzlage A, PP-Verbundstoff)

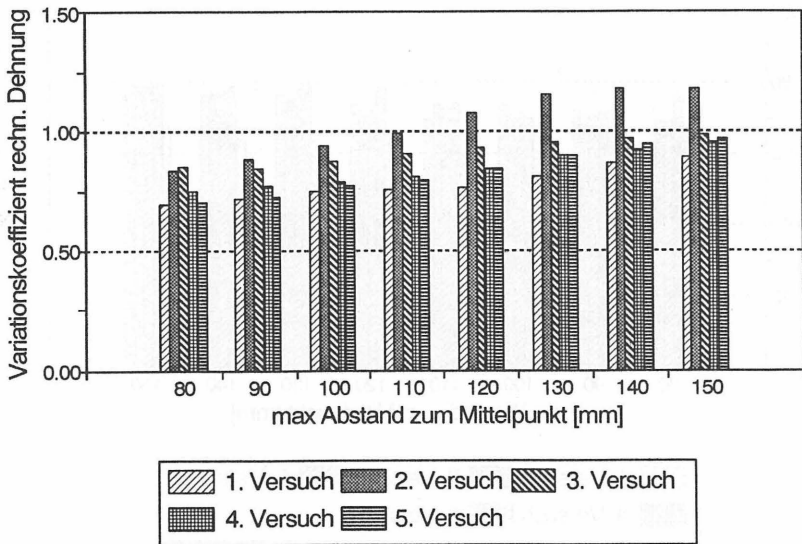


Bild 73.2: Variationskoeffizient der rechnerischen Dehnungen
(Schutzlage B, PEHD-Verbundstoff)

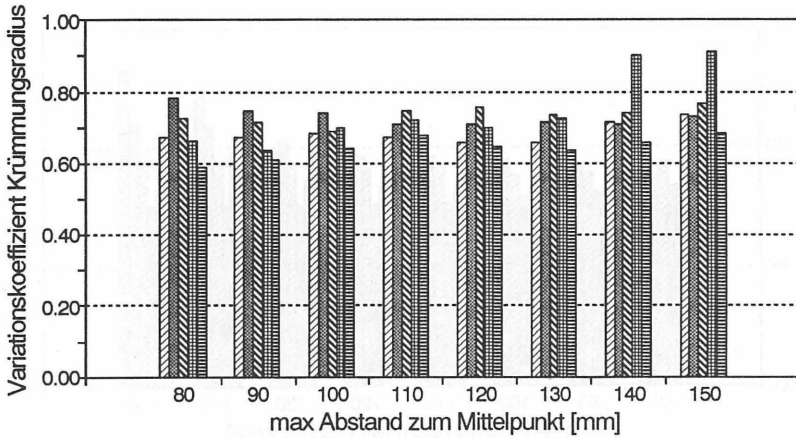


Bild 74.1: Variationskoeffizient der berechneten Krümmungsradien (Schutzlage A, PP-Verbundstoff)

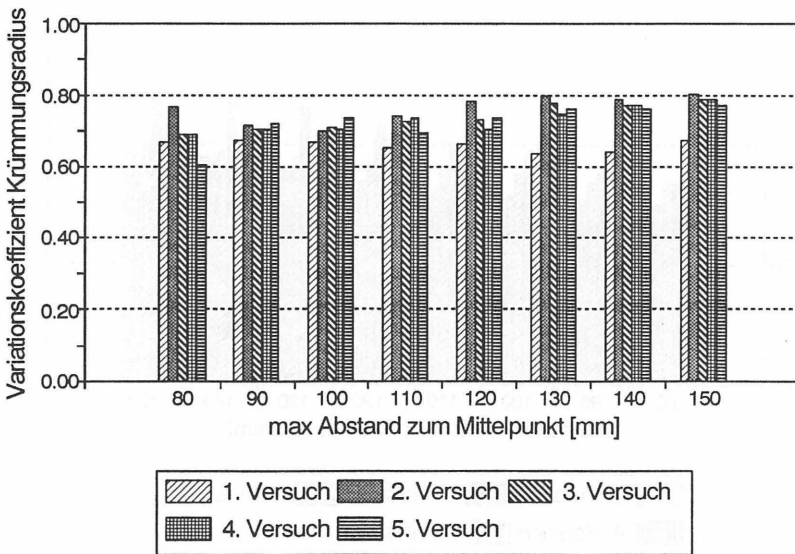


Bild 74.2: Variationskoeffizient der berechneten Krümmungsradien (Schutzlage B, PEHD-Verbundstoff)

Die Bilder zeigen jeweils ein für beide Schutzlagen etwa ähnliches Verhalten. Die Variationskoeffizienten liegen für die fünf Versuche bis zu einem für die Auswertung erfaßten Radius (maximaler Abstand zum Mittelpunkt) von 110 mm bis 120 mm in einem etwa gleichbleibenden Schwankungsbereich. Erst ab einer Auswertung, die auch die Bereiche $\approx > 120$ mm erfaßt, ergeben sich zunehmend sowohl größere Absolutwerte, als auch größere Differenzen zwischen den Variationskoeffizienten der einzelnen Teilversuche. Dies ist deutlicher in der Darstellung der Streuung der rechnerischen Dehnungen, Bild 73.1, zu erkennen.

Die Entwicklung der Variationskoeffizienten der Krümmungsradien zeigt darüber hinaus auch ab einem erfaßten Radius von $\approx < 90 - 100$ mm eine Zunahme der Differenzen zwischen den Parallelversuchen. Die beste Übereinstimmung zeigt sich nach den in den Bildern 74.1 und 74.2 aufbereiteten Ergebnissen bei einer Auswertung der Meßwerte bis zu einem Abstand von 100 mm bis 120 mm.

Während sich bei Berücksichtigung der Werte bis in den äußersten Randbereich der Einfluß der Randstörungen auswirkt, beruhen die erkennbar zunehmenden Streuungen in den Ergebnissen (Schwankungen der entsprechenden Variationskoeffizienten) bei Berücksichtigung nur der mittleren Probenbereiche (ab ca. < 100 mm) auf der sich mit Eingrenzung der berücksichtigten Bereiche verringernden Datenbasis. So werden bei Auswertung bis zu einem Abstand zum Mittelpunkt von maximal 80 mm 797 Meßpunkte erfaßt. Bei einem Radius von 100 mm gehen bereits 1.257, bei einem Radius von 120 mm 1.793 Werte der insgesamt 2.617 Abtastpunkte (bei 5 mm Raster) in die Auswertung ein.

Um eine möglichst große Datenmenge in die jeweiligen Auswertungen mit einbeziehen zu können, ohne aber Verfälschungen durch Randstörungen hineinzubekommen, wird im weiteren nur jeweils ein Bereich innerhalb eines Radius von 120 mm um den Probenmittelpunkt berücksichtigt.

5.6.2.2 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Bei allen experimentellen Nachweisen sind von Versuch zu Versuch Schwankungen in den Ergebnissen zu erwarten. Die Größe solcher

unvermeidbaren Differenzen hängt davon ab, wie genau sich einerseits der Versuch an sich durchführen läßt und wie gut andererseits die Erfassung der Ergebnisse gelingt.

Bei der Auswertung der zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des Zeitstandlastplattendruckversuches durchgeführten Teilversuche werden im folgenden lediglich die Ergebnisse der mit einer Elastomerunterlage ausgerüsteten Versuche betrachtet. Nur für diese Reihe konnten beide Verfahren der Meßwerterfassung (Raster und Meßachsen) eingesetzt werden. Die mit der Raster-Abtastung mögliche, quasi flächige Oberflächenaufnahme war wegen der für diesen Zweck angestrebten, möglichst hohen Genauigkeit bei der Erfassung der Verformungen erforderlich.

In der Tabelle 14.1 sind die Ergebnisse der Teilversuche, bei denen die Schutzlage A (PP-Verbundstoff, Vlies + Gewebe, 2000 g/m²) eingelegt war, wiedergegeben. Tabelle 14.2 beinhaltet die entsprechenden Werte aus den mit der Schutzlage B (PEHD-Verbundstoff, Vlies + Gewebe, 2000 g/m²) durchgeführten Teilversuchen.

Aus den tabellierten Werten geht hervor, daß sich die Ergebnisse der einzelnen Teilversuche innerhalb beider betrachteter Serien deutlich voneinander unterscheiden. Dies gilt sowohl für die Maximalwerte als auch für die Größen, die den Zustand der gesamten Probe wiedergeben – wie das arithmetische Mittel, bzw. der Erwartungswert. Die insgesamt größeren Streuungen sind in der Versuchsreihe mit der Schutzlage A festzustellen, bei der besonders die zu $\epsilon = 9,65\%$ ermittelte maximale rechnerische Dehnung (REPREA4) hervorsticht (gegenüber $\epsilon = 2,98\%$ bei REPREA1 und REPREA5). Dieser hohe Wert spiegelt sich im betreffenden arithmetischen Mittel nicht wider, was zeigt, daß kein in der Versuchsdurchführung bedingter Fehler (z.B.: Einstellen einer zu hohen Belastung) vorliegt. Das Ergebnis muß daher bei der Abschätzung und Beurteilung möglicher Streuungen berücksichtigt werden.

Ein Vergleich der Streuungen beider Versuchsreihen (Schutzlage A und B) ist anhand der beispielhaft für die Werte der rechnerischen und mittleren Dehnung in der Tabelle 15 berechneten Größen möglich.

		Teilversuch				
		REPRA1	REPRA2	REPRA3	REPRA4	REPRA5
		***** MINIMUM *****				
rechn. Dehnung	[%]	0,014	0,017	0,010	0,014	0,017
mittl. Dehnung	[%]	0,006	0,006	0,005	0,008	0,007
Krümmungsradius	[mm]	26,12	18,20	16,88	9,76	20,44
Dehnung der Randfaser	[%]	- 4,78	- 6,87	- 7,40	-12,79	- 6,11
		***** MAXIMUM *****				
rechn. Dehnung	[%]	2,98	4,86	4,52	9,65	2,98
mittl. Dehnung	[%]	2,24	3,67	4,07	7,80	2,86
Krümmungsradius	[mm]	625,8	712,0	841,2	722,9	836,2
Dehnung der Randfaser	[%]	3,88	3,98	4,90	4,68	4,21
		***** ARITHMETISCHES MITTEL *****				
rechn. Dehnung	[%]	0,57	1,07	0,69	1,08	0,54
mittl. Dehnung	[%]	0,37	0,70	0,44	0,69	0,34
Krümmungsradius	[mm]	104,5	85,2	100,7	84,6	69,1
Dehnung der Randfaser	[%]	- 0,34	- 0,65	- 0,39	- 0,72	- 0,27
		***** VARIATIONSKOEFFIZIENT *****				
rechn. Dehnung		0,839	0,762	0,933	0,971	0,950
mittl. Dehnung		0,937	0,851	1,016	1,037	1,022
Krümmungsradius		0,657	0,709	0,756	0,698	0,647
Dehnung der Randfaser		4,986	3,137	4,911	3,117	6,539
		***** ERWARTUNGSWERT *****				
rechn. Dehnung	[%]	0,720	1,309	0,921	1,611	0,699
mittl. Dehnung	[%]	0,484	0,890	0,665	1,138	0,450
Krümmungsradius	[mm]	134,5	119,5	141,2	118,3	146,7
Dehnung der Randfaser	[%]	0,102	- 0,112	0,234	0,159	0,246

Tabelle 14.1: Ergebnisse der Raster-Abtastung,
Versuche: REPRA1-5, Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Die aus den Meßwerten ermittelten Streuungen innerhalb der beiden Versuchsserien unterscheiden sich sowohl in den Absolutwerten (Standardabweichung) als auch bei auf den jeweiligen Mittelwert bezogenen Vergleichen, erheblich. Die Maximalwerte der Dehnungen zeigen zum Beispiel innerhalb der Teilversuche, Schutzlage A, eine Variabilität von $V \% = 54,8$, gegenüber $V \% = 21,8$ für die Teilversuche mit der

Schuttlage B. Die Streuung der Erwartungswerte des selben Parameters ist zwar insgesamt kleiner, unterscheidet sich aber zwischen den beiden Serien noch deutlich ($V\% = 37,7$ gegenüber $V\% = 10,6$).

Teilversuch					
	REPBE1	REPBE2	REPBE3	REPBE4	REPBE5
***** MINIMUM *****					
rechn. Dehnung [%]	0,020	0,006	0,010	0,010	0,005
mittl. Dehnung [%]	0,103	0,004	0,005	0,005	0,003
Krümmungsradius [mm]	13,39	10,84	11,85	12,73	11,76
Dehnung der Randfaser [%]	- 9,33	-11,53	-10,54	- 9,82	-10,62
***** MAXIMUM *****					
rechn. Dehnung [%]	4,46	6,22	7,92	5,37	5,60
mittl. Dehnung [%]	3,94	5,38	6,51	3,98	5,00
Krümmungsradius [mm]	627,5	836,0	559,0	835,8	724,5
Dehnung der Randfaser [%]	4,54	4,16	4,53	7,44	5,15
***** ARITHMETISCHES MITTEL *****					
rechn. Dehnung [%]	0,98	0,84	1,12	1,00	1,02
mittl. Dehnung [%]	0,63	0,50	0,71	0,61	0,64
Krümmungsradius [mm]	80,6	91,8	81,7	77,3	78,0
Dehnung der Randfaser [%]	- 0,62	- 0,71	- 0,69	- 0,92	- 0,60
***** VARIATIONSKOEFFIZIENT *****					
rechn. Dehnung	0,765	1,074	0,931	0,845	0,840
mittl. Dehnung	0,841	1,120	1,022	0,917	0,933
Krümmungsradius	0,664	0,779	0,727	0,710	0,734
Dehnung der Randfaser	3,607	3,129	3,373	2,511	3,991
***** ERWARTUNGSWERT *****					
rechn. Dehnung [%]	1,207	1,182	1,528	1,276	1,303
mittl. Dehnung [%]	0,831	0,835	1,084	0,819	0,913
Krümmungsradius [mm]	110,5	133,6	108,2	120,4	113,2
Dehnung der Randfaser [%]	0,046	0,059	0,042	-0,026	0,210

Tabelle 14.2: Ergebnisse der Raster-Abtastung,
Versuche: REPBE1-5, Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, daß die beiden aus je fünf Teilversuchen bestehenden Serien eine Aussage zu einer aus dem Zeitstandlastplattendruckversuch zu erwartenden Streuung nicht zulassen. Die festgestellten Schwankungen sowohl in bezug auf die Maximalwerte als

auch hinsichtlich der die Eigenschaft der gesamten Probenfläche beschreibenden Größen, unterscheiden sich zwischen den beiden Serien zu deutlich, als daß daraus ein für den Versuch generell – je nach Parameter – zu berücksichtigender Streubereich abgeleitet werden könnte.

Dehnung	Maximum		arithm. Mittel		Erwartungswert	
	rechn	mittl	rechn	mittl	rechn	mittl
Schutzlage A PP-Verbundstoff 2.000 g/m ²						
Mittelwert	5,00	4,13	0,79	0,51	1,05	0,73
Standwg s	2,47	2,17	0,27	0,17	0,40	0,29
Variabk V %	54,82	52,61	33,69	34,36	37,74	39,92
Schutzlage B PEHD-Verbundstoff 2.000 g/m ²						
Mittelwert	5,91	4,96	0,99	0,62	1,30	0,90
Standwg s	1,29	1,07	0,10	0,08	0,14	0,11
Variabk V %	21,76	21,56	10,05	12,29	10,55	12,42

Tabelle 15: Vergleich der Streuung der rechn. und mittl. Dehnung Versuchsserie mit Schutzlage A und B

Trotz der beschriebenen Schwankungen lassen die Ergebnisse Unterschiede erkennen, die auf die Wirkungen der eingesetzten Schutzlagen zurückzuführen sind. So zeigt ein Vergleich der Mittelwerte der maximalen Dehnungen (rechn. und mittl.), daß mit der Schutzlage A (PP-Verbundstoff) eine insgesamt als besser einzustufende Wirkung zu verzeichnen ist, als mit der Schutzlage B (PEHD-Verbundstoff). Der Unterschied ist zwar nicht quantifizierbar, ermöglicht aber eine vergleichende Einstufung.

Zur Abschätzung, welche Aussagekraft bzw. Genauigkeiten, gemessen an den Ergebnissen der flächigen Raster-Abtastung, mit der wesentlich weniger aufwendigen Abtastung entlang von Meßachsen erreicht werden kann, wurden alle Proben über 6 Achsen mit einem Intervall von 5 mm abgefahren. Die Ergebnisse der auf dem Elastomer durchgeführten Versuchsserien sind in den Tabellen 16.1 bis 17.2 zusammengestellt.

Die für jede Meßachse aufsummierten Teildehnungen der einzelnen Abtastintervalle mit daraus abgeleiteten statistischen Größen zeigen Tabelle 16.1 (Versuche REPRA1-5) und Tabelle 16.2 (Versuche REPBE1-5).

Die die Unebenheiten einer jeden Meßachse beschreibenden Summen der für jeden Meßpunkt bestimmten Winkelveränderungen sind in der Tabelle 17.1 (Versuche REPREA1-5) und der Tabelle 17.2 (Versuche REPRES1-5) wiedergegeben.

	Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%]				
	REPREA1	REPREA2	REPREA3	REPREA4	REPREA5
Meßachse 1	6,23	11,69	8,64	28,68	11,89
Meßachse 2	9,34	17,81	15,26	17,91	16,42
Meßachse 3	6,32	16,94	23,99	18,94	16,95
Meßachse 4	14,07	31,98	9,49	38,56	8,52
Meßachse 5	16,12	31,76	8,08	28,02	7,79
Meßachse 6	19,32	16,69	12,23	16,93	7,70
Summe	71,39	126,88	77,69	149,03	69,27
Mittelwert	11,90	21,45	12,95	24,83	11,55
Standwg s	5,43	8,59	6,03	8,47	4,27
Variabk V %	45,63	40,03	46,59	34,10	36,96

Tabelle 16.1: Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%],
Versuche: REPREA1-5, Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

	Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%]				
	REPRES1	REPRES2	REPRES3	REPRES4	REPRES5
Meßachse 1	20,80	13,36	20,12	8,97	17,77
Meßachse 2	18,95	6,49	18,35	26,58	22,04
Meßachse 3	17,41	23,66	23,32	22,87	15,43
Meßachse 4	13,40	17,92	18,71	16,19	45,56
Meßachse 5	24,15	17,73	29,86	14,69	18,01
Meßachse 6	23,99	8,44	26,68	22,58	16,28
Summe	118,71	87,59	137,03	111,87	135,09
Mittelwert	19,78	14,60	22,84	18,64	22,52
Standwg s	4,12	6,45	4,67	6,50	11,52
Variabk V %	20,83	44,19	20,43	34,90	51,14

Tabelle 16.2: Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%],
Versuche: REPRES1-5, Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Bei allen Versuchen sind für beide in den Tabellen aufgelisteten Parameter bereits deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Meßachsen erkennbar. Die nachgeschaltete statistische Auswertung bestätigt darüber

hinaus die bereits aus der Raster-Abtastung abgeleitete Feststellung, daß erhebliche Schwankungen zwischen den Teilversuchen einer Serie (Schuttlage A oder B) registriert wurden.

	Summe der Winkeländerungen über jede Meßachse [Grad]				
	REPREA1	REPREA2	REPREA3	REPREA4	REPREA5
Meßachse 1	2,03	2,55	2,32	4,45	2,78
Meßachse 2	2,51	3,40	3,02	3,33	3,26
Meßachse 3	2,14	3,24	4,22	3,18	3,19
Meßachse 4	2,94	4,57	2,38	4,74	2,29
Meßachse 5	3,23	4,65	2,25	3,99	2,17
Meßachse 6	3,42	3,15	2,53	2,88	2,22
Summe	16,26	21,57	16,69	22,57	15,91
Mittelwert	2,71	3,59	2,78	3,76	2,62
Standwg s	0,58	0,84	0,75	0,75	0,50
Variabk V %	21,23	23,36	27,14	19,85	18,94

Tabelle 17.1: Summe Winkeländerungen jeder Meßachse [Grad],
Versuche: REPREA1-5, Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

	Summe der Winkeländerungen über jede Meßachse [Grad]				
	REPRES1	REPRES2	REPRES3	REPRES4	REPRES5
Meßachse 1	3,68	2,78	3,68	2,36	3,32
Meßachse 2	3,38	2,07	3,30	4,20	3,74
Meßachse 3	3,39	3,24	3,86	3,76	2,98
Meßachse 4	3,11	3,38	3,19	3,29	5,29
Meßachse 5	4,26	3,22	3,94	3,17	3,43
Meßachse 6	3,92	2,17	4,10	3,87	3,15
Summe	21,74	16,76	22,07	20,65	21,92
Mittelwert	3,62	2,79	3,68	3,44	3,65
Standwg s	0,42	0,57	0,36	0,65	0,84
Variabk V %	11,55	20,52	9,88	18,96	23,10

Tabelle 17.2: Summe Winkeländerungen jeder Meßachse [Grad],
Versuche: REPRES1-5, Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Für die Bewertung der Wirksamkeit einer Schuttlage durch den Zeitstandlastplattendruckversuch ist die maximal feststellbare Dehnung das alleinige Kriterium. Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit dieses Wertes sind in der Tabelle 18 die errechneten maximalen Dehnungen (rechn.

und mittl.) aus allen auf der Elastomer-Unterlage durchgeführten Teilversuchen zusammengefaßt. Es sind sowohl die Werte aus der Raster-Abtastung als auch die aus der linienförmigen Abtastung entlang der Meßachsen wiedergegeben.

	Maximale Dehnungen [%]					arithm Mittel
	REPREA1	REPREA2	REPREA3	REPREA4	REPREA5	
Raster rechn. mittl.	2,98 2,24	4,86 3,67	4,52 4,07	9,65 7,80	2,98 2,86	5,00 4,13
Meßachsen rechnerisch geglättet	2,02 1,59	2,81 2,44	2,65 1,94	7,51 4,87	2,66 1,80	3,53 2,53
	REPRES1	REPRES2	REPRES3	REPRES4	REPRES5	
Raster rechn. mittl.	4,46 3,94	6,22 5,38	7,92 6,51	5,37 3,98	5,60 5,00	5,91 4,96
Meßachsen rechnerisch geglättet	3,59 2,55	5,69 3,73	4,44 3,21	3,88 2,59	6,07 4,30	4,73 3,28

Tabelle 18: Maximale Dehnungen, Versuche mit Elastomer-Unterlage

Die in der Tabelle 18 zusammengefaßten Werte belegen, daß - unabhängig vom Abtastverfahren - mit dem Zeitstandlastplattendruckversuch auch in bezug auf die feststellbaren maximalen Dehnungen keine hohe Aussagesicherheit erreicht werden kann. Bei Einbeziehung der Ergebnisse aus allen fünf durchgeführten Teilversuchen einer Serie ist jedoch auch mit der ungenaueren Meßachsen-Auswertung eine qualitative Unterscheidung der Wirkung der verwendeten Schutzlagen möglich.

5.6.2.3 Auswirkungen des Untergrundes

Die auf einem mineralischen Untergrund (Schluff) durchgeführten Versuche wurde alle durch Abtastungen der verformten Bleche über jeweils 6 Meßachsen mit einem Abtastintervall von 5 mm ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Vermessung sind in den Tabellen 19.1 und 19.2 (Dehnungen für Schutzlage A und B) und den Tabellen 20.1 und 20.2

(Winkelveränderungen für Schutzlage A und B) zusammengefaßt. Ein Vergleich dieser Werte mit denen der bereits im vorangegangenen Abschnitt wiedergegebenen Tabellen 16.1 bis 17.2 (Elastomer-Unterlage) läßt eine Abschätzung des Einflusses des Untergrundes auf die feststellbaren Verformungen zu.

	Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%]				
	REPRSA1	REPRSA2	REPRSA3	REPRSA4	REPRSA5
Meßachse 1	13,27	13,02	6,08	12,83	7,87
Meßachse 2	9,10	8,07	4,71	12,11	9,07
Meßachse 3	7,58	14,94	4,80	18,08	18,40
Meßachse 4	5,69	14,40	10,98	14,08	14,68
Meßachse 5	15,18	15,15	9,97	15,74	9,85
Meßachse 6	7,54	9,40	5,80	8,89	11,52
Summe	58,36	74,99	42,33	81,73	71,38
Mittelwert	9,73	12,50	7,06	13,62	11,90
Standwg s	3,70	3,04	2,72	3,16	3,96
Variabk V %	38,00	24,29	38,54	23,19	33,31

Tabelle 19.1: Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%],
Versuche: REPRSA1-5, Auswertung im Bereich ϕ 200 mm

	Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%]				
	REPRSB1	REPRSB2	REPRSB3	REPRSB4	REPRSB5
Meßachse 1	3,69	15,82	13,04	8,61	13,21
Meßachse 2	3,73	14,90	16,77	8,30	18,36
Meßachse 3	6,69	4,01	21,14	19,03	14,62
Meßachse 4	7,00	7,35	17,47	12,62	9,23
Meßachse 5	4,82	8,22	15,10	6,26	4,72
Meßachse 6	8,28	8,72	18,20	9,66	5,56
Summe	34,20	59,02	101,72	64,89	65,70
Mittelwert	5,70	9,84	16,95	10,75	10,95
Standwg s	1,90	4,59	2,14	4,55	5,37
Variabk V %	33,31	46,67	12,60	42,37	49,06

Tabelle 19.2: Summe der Einzeldehnungen einer jeden Meßachse [%],
Versuche: REPRSB1-5, Auswertung im Bereich ϕ 200 mm

Die Summen der über jede Meßachse berechneten Teildehnungen fallen bei den Versuchen mit dem mineralischen Untergrund sowohl für die

Schuttlage A als auch für die Schuttlage B erkennbar geringer aus, als bei den Parallelversuchen mit der Elastomer-Unterlage.

Bei einem Vergleich der Zahlenwerte ist zu berücksichtigen, daß die Vermessungen, abhängig vom Untergrund, über unterschiedliche Bereiche erfolgte, um eine Erfassung der durch Randeinflüsse unterschiedlich weit gestörten Außenbereiche zu vermeiden. Aus diesem Umstand ergaben sich je 61 Meßpunkte bei der Elastomer-Unterlage (ausgewerteter Bereich ϕ 240 mm) und 51 Meßwerte für den mineralischen Untergrund (ausgewerteter Bereich ϕ 200 mm).

Die entsprechend bereinigten Mittelwerte der in den Tabellen wiedergegebenen Dehnungen (als Summe der Einzeldehnungen über die jeweilige Meßachse) weisen Differenzen von $\approx 30\%$ (Schuttlage A) bzw. $\approx 50\%$ (für Schuttlage B) - bezogen auf die geringeren Werte aus den mit dem mineralischen Untergrund durchgeführten Versuchen - auf.

	Summe der Winkeländerungen über jede Meßachse [Grad]				
	REPRSA1	REPRSA2	REPRSA3	REPRSA4	REPRSA5
Meßachse 1	2,69	2,51	1,69	2,70	2,09
Meßachse 2	2,34	2,04	1,65	2,51	1,95
Meßachse 3	2,07	2,70	1,66	2,96	3,10
Meßachse 4	1,83	2,57	2,38	2,74	2,65
Meßachse 5	2,76	2,77	2,26	3,02	2,08
Meßachse 6	1,88	2,16	1,85	2,15	2,61
Summe	13,56	14,75	11,47	16,08	14,48
Mittelwert	2,26	2,46	1,91	2,68	2,41
Standwg s	0,40	0,29	0,32	0,32	0,45
Variabk V %	17,77	11,99	16,97	11,89	18,53

Tabelle 20.1: Summe Winkeländerungen jeder Meßachse [Grad],
Versuche: REPRSA1-5, Auswertung im Bereich ϕ 200 mm

Die über die errechneten Winkelveränderungen registrierbaren Unebenheiten der Bleche lassen ebenfalls größere Werte für die künstliche Unterlage erkennen. Die bereinigten Mittelwerte der Winkelveränderungen (Summe über jede Meßachse) ergeben zwischen den Versuchen mit den beiden verwendeten Unterlagen Differenzen von $\approx 10\%$ (Schuttlage A) bzw. $\approx 25\%$ (für

Schutzlage B), wieder bezogen auf die geringeren Werte aus den mit dem mineralischen Untergrund durchgeführten Versuchen.

	Summe der Winkeländerungen über jede Meßachse [Grad]				
	REPRSB1	REPRSB2	REPRSB3	REPRSB4	REPRSB5
Meßachse 1	1,35	2,90	2,87	2,23	2,54
Meßachse 2	1,33	2,86	2,75	2,11	2,99
Meßachse 3	1,83	1,41	3,40	3,12	2,58
Meßachse 4	1,95	1,95	2,93	2,43	2,34
Meßachse 5	1,60	2,02	2,78	1,71	1,52
Meßachse 6	1,82	2,31	3,39	2,15	1,91
Summe	9,89	13,46	18,11	13,75	13,89
Mittelwert	1,65	2,24	3,02	2,29	2,32
Standwgs	0,26	0,57	0,30	0,47	0,52
Variabk V %	15,95	25,62	9,85	20,49	22,59

Tabelle 20.2: Summe Winkeländerungen jeder Meßachse [Grad],
Versuche: REPRSB1-5, Auswertung im Bereich ϕ 200 mm

Die mit den Abtastungen erfaßten maximalen Deformationen sind in der Tabelle 21 (für Schluff-Untergrund) - bereits umgerechnet in Dehnungen - zusammengestellt. Die Auswirkungen des Untergrundes lassen sich auch durch Vergleich dieser Werte mit den in der Tabelle 18 (für Elastomer-Unterlage) wiedergegebenen Größen erkennen.

	Maximale Dehnungen [%]					arithm Mittel
	REPRSA1	REPRSA2	REPRSA3	REPRSA4	REPRSA5	
Meßachsen rechnerisch geglättet	2,01	3,30	1,22	2,74	3,29	2,51
	1,52	2,82	1,03	2,13	3,25	2,15
	REPRSB1	REPRSB2	REPRSB3	REPRSB4	REPRSB5	
Meßachsen rechnerisch geglättet	1,89	2,79	3,59	4,82	2,52	3,12
	1,18	2,01	3,21	3,75	1,93	2,42

Tabelle 21: Maximale Dehnungen, Versuche mit Schluff-Unterlage

Die Auswertung der maximalen Dehnungen belegt ebenfalls das für die Beanspruchung der Dichtungsbahn günstigere Verhalten des mineralischen Untergrundes. Bei Berücksichtigung nur der aus der Meßachsen-Abtastung erfaßten Verformungen weisen die maximalen rechnerischen Dehnungen abhängig vom verwendeten Untergrund (Schluff $\Leftrightarrow$ Elastomer) im Mittel Differenzen von $\approx 40\%$ (Schutzlage A), bzw. von $\approx 50\%$ (Schutzlage B) auf.

Aus den in der Tabelle 21 wiedergegebenen Ergebnissen ist ebenfalls die insgesamt bessere Wirkung der Schutzlage A (PP-Verbundstoff) zu erkennen.

5.6.3 Zusammenfassende Bewertung

Die als sogenannte "Reproduktionsversuche" durchgeführten Versuchsserien zeigen, daß der Zeitstandlastplattendruckversuch Ergebnisse liefert, die von Teilversuch zu Teilversuch in einem erheblichen Maße variieren. Das zur Erfassung der Verformungen eingesetzte Abtast- und Auswertverfahren bietet eine hohe Gewähr dafür, daß die Resultate im wesentlichen nur die versuchsbedingten Schwankungen wiedergeben. Ein Vergleich der Werte ermöglicht daher eine unmittelbare Beurteilung der Güte des Versuches.

Innerhalb der jeweils fünf Teilversuche mit verschiedenen Schutzlagen/Untergrund-Konstellationen wurden für den zur Beurteilung vorgesehenen Wert der maximalen Dehnung Schwankungen von im Mittel $\pm 44\%$ mit Maximalwerten von $\pm 58\%$, bezogen auf den mittleren Wert, festgestellt. In Bild 75.1 sind die aus der Abtastung entlang 6 Meßachsen hergeleiteten unterschiedlichen maximalen Dehnungen für die Schutzlage A einander graphisch gegenübergestellt. Bild 75.2 zeigte die gleichen Zusammenhänge für die Schutzlage B.

Die Schwankungen von Parametern, welche die gesamte Verformung der abgetasteten Bleche beschreiben, fallen beispielsweise für die Erwartungswerte der Dehnungen (aus der Raster-Abtastung) mit im Mittel $\pm 26\%$ geringer aus. Jedoch wurden auch für diese Größen maximale Schwankungen zwischen den einzelnen Teilversuchen einer Serie von $\pm 40\%$ ($V\% \approx 38$) ermittelt, wieder bezogen auf den entsprechenden mittleren Wert.

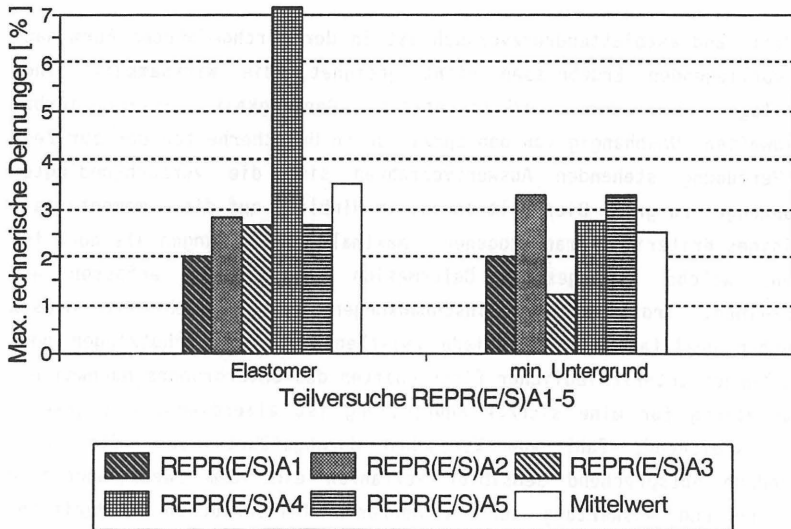


Bild 75.1: Max. rechn. Dehnungen der Teilversuche, Schutzlage A
Ergebnisse aus Abtastung entlang 6 Meßachsen, $l_i = 5 \text{ mm}$

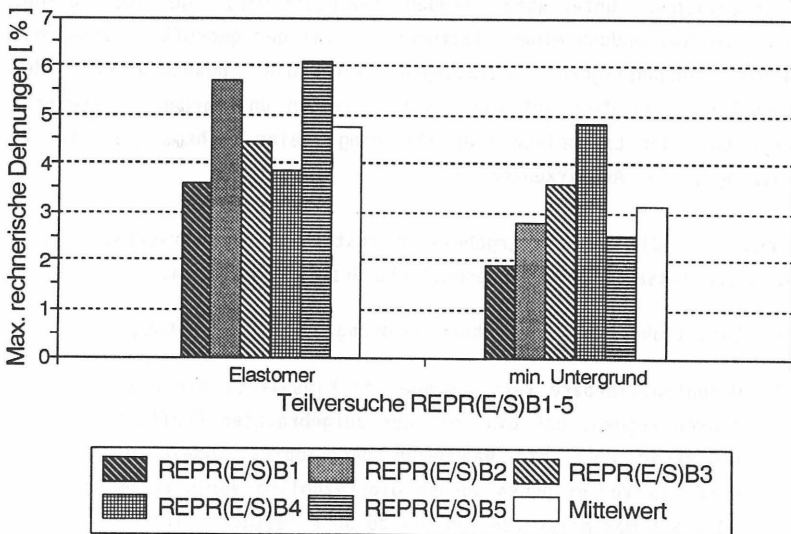


Bild 75.2: Max. rechn. Dehnungen der Teilversuche, Schutzlage B
Ergebnisse aus Abtastung entlang 6 Meßachsen, $l_i = 5 \text{ mm}$

Der Zeitstandlastplattendruckversuch ist in der durchgeführten Form nach den vorliegenden Ergebnissen nicht geeignet, die Wirksamkeit einer Schutzlage in der vorausgesetzten Genauigkeit reproduzierbar nachzuweisen. Unabhängig von den spezifischen Unsicherheiten der zur Zeit zur Verfügung stehenden Auswertverfahren sind die versuchsbedingten Schwankungen zu groß. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die - momentan als alleiniges Kriterium herangezogenen - maximalen Verformungen als auch für Größen, welche die gesamte Deformation des Bleches erfassen und beschreiben. Trotz dieser Einschränkungen lassen sich mit diesen Versuchen qualitative Unterschiede zwischen einzelnen Schutzlagen oder Auswirkungen unterschiedlicher Eigenschaften des Untergrundes nachweisen. Voraussetzung für eine sichere Beurteilung ist allerdings, daß jeweils eine ausreichende Zahl von Versuchen durchgeführt wird, die unter Verwendung entsprechend sensibler Verfahren eine dem Zweck angepaßte Erfassung und Auswertung der in mehreren Teilversuchen produzierten Verformungen ermöglichen.

Wie anhand der Ergebnisse aus den Parallelversuchen mit den beiden unterschiedlichen Unterlagen (Boden $\Leftrightarrow$ Elastomer) gezeigt wurde, bedeutet die Verwendung eines Elastomeres - bei dem geprüften Lastniveau - meßbar ungünstigere Bedingungen für die Beanspruchung der Dichtungsbahn, als dies auf einem mineralischen Untergrund zu erwarten ist. Die Güte der Ergebnisse läßt allerdings keine sichere quantitative Abschätzung dieser Auswirkungen zu.

Als Grund für die in den Ergebnissen feststellbaren versuchsbedingten Schwankungen lassen sich zwei wesentliche Ursachen anführen:

1. Zufälligkeiten bei der Kornanordnung der Kiesschüttung
2. Unkontrollierbare Verspannungen im Kiespaket, die dazu führen können, daß ein Teil der aufgebrachtten Prüflast unwirksam über die Wandungen des Topfes abgeleitet wird. In Vorversuchen wurden diesbezüglich Verluste um 20 % mit Maximalwerten von bis zu 30 % festgestellt.

5.7 Versuche mit unterschiedlichen Schutzlagen

5.7.1 Versuchsbedingungen und Versuchsmatrix

Wie die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Versuche ergeben haben, ist eine Unterscheidung der Wirkung verschiedener Schutzlagen im Zeitstandlastplattendruckversuch mit Hilfe der rechnergesteuerten Abtastung der verformten Bleche und der zugehörigen nachgeschalteten Auswertung möglich. Mit der nachfolgend beschriebenen Versuchsreihe sollten insgesamt fünf verschiedene Schutzschichten miteinander verglichen werden, um die selektiven Möglichkeiten des Versuches herauszuarbeiten. Durch entsprechende Variationen im Versuchsaufbau werden die meßbaren Effekte der einzelnen Komponenten einschließlich der Wirkung der Kunststoffdichtungsbahn dargestellt.

Auch bei dieser Serie wurden jeweils Parallelversuche mit der Elastomer-Unterlage und dem mineralischen Untergrund (Schluff) durchgeführt. Insgesamt wurden fünf verschiedene Schutzschichten eingesetzt, die teilweise aus Kombinationen verschiedener Materialien bestanden. Die Auswahl orientierte sich an den zur Zeit häufig zur Verwendung vorgesehenen Produkten, bzw. an den in einschlägigen Richtlinien empfohlenen Aufbauten. Im einzelnen kamen folgende Schutzschichten zum Einsatz:

Schutzschicht A ==> PEHD-Vlies ($\approx 1.200 \text{ g/m}^2$)
+ Sand 0/2 (Einbaudicke $d_s = 10 \text{ cm}$)

Schutzschicht B ==> PEHD-Vlies ($\approx 1.200 \text{ g/m}^2$)
+ Kies 2/8 (Einbaudicke $d_k = 15 \text{ cm}$)

Schutzschicht C ==> PEHD-Vlies + Gewebe (ges. $\approx 2.000 \text{ g/m}^2$)*

Schutzschicht D ==> PEHD-Vlies + Gewebe (ges. $\approx 3.000 \text{ g/m}^2$)*

Schutzschicht E ==> Bentonitmatte (bestehend aus: Vlies 400 g/m^2
- Bentonit - Verbundstoff 800 g/m^2)**

* Die Verbundstoffe wurden jeweils mit dem Gewebe nach oben, d.h. zum Kies gewendet, eingebaut.

** Die Bentonitmatte, aufgebaut aus Vlies 400 g/m^2 - Bentonit - Verbundstoff 800 g/m^2 , wurde mit dem Verbundstoff zum Kies hin eingebaut. Das Gewebe des Verbundstoffes war an der Innenseite des Vlieses (zum Bentonit) plziert.

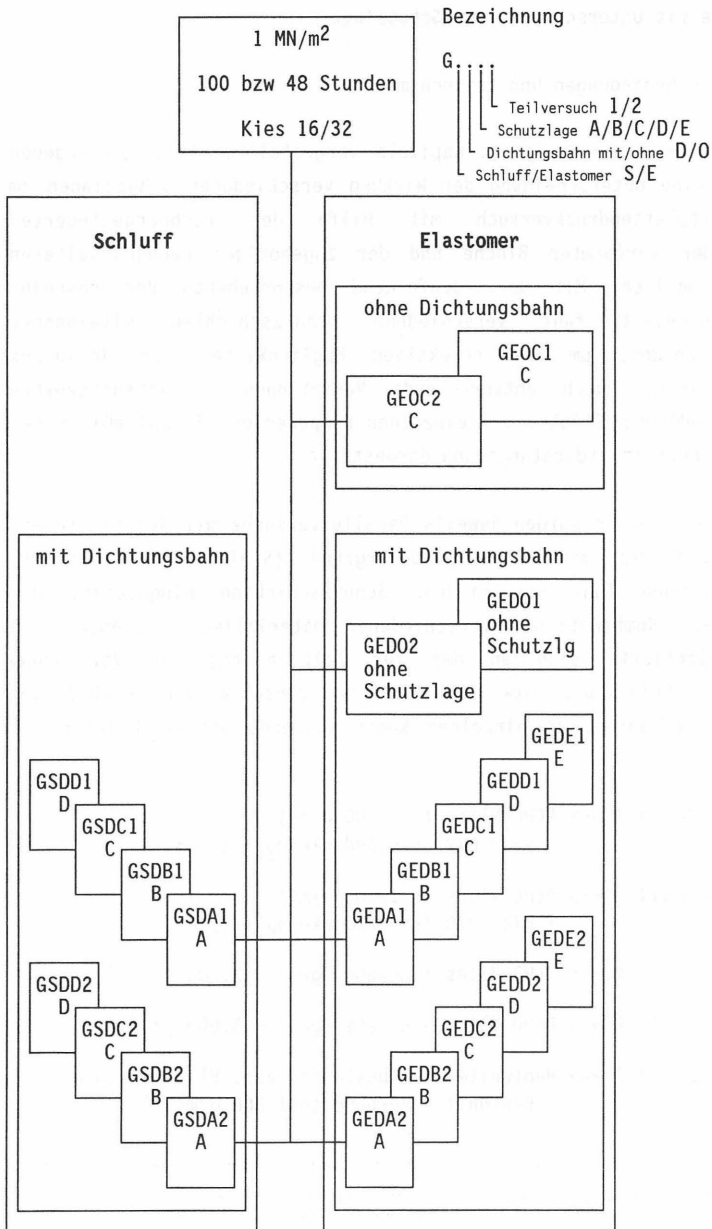


Bild 76: Versuchsmatrix der Versuche mit unterschiedlichen Schutzlagen

Jeder Teilversuch wurde zur Absicherung der Ergebnisse unter gleichbleibenden Bedingungen wiederholt. Als Prüflast wurde durchgehend die einer Spannung von 1 MN/m^2 entsprechende Belastung eingestellt.

Als Belastungsdauer wurde für die Versuche auf dem mineralischen Untergrund ein Zeitraum von 100 Stunden gewählt, während die Teilversuche mit der Elastomer-Unterlage über 48 Stunden belastet blieben. Diese Unterscheidung konnte gemacht werden, da bei den vorangegangenen Versuchen beobachtet wurde, daß bei Verwendung der künstlichen Unterlage bereits nach dieser Zeit kein Abfall des Druckes der Belastungseinrichtung mehr festzustellen war. Dies läßt sich dahingehend interpretieren, daß ab diesem Zeitpunkt praktisch keine weiteren, die Ergebnisse dieser Versuchsreihe beeinflussenden Veränderungen in dem Versuchsaufbau stattfinden.

Als Dränagematerial wurde bei allen Versuchen ein Kies der Körnung 16/32 als lose Schüttung eingebaut.

Die für diese Versuchsreihe verwendeten Schutzlagen lassen sich in drei Kategorien einteilen:

1. Schutzschicht A und B als Kombination verschiedener Materialien, die weitgehend unabhängig voneinander in zwei verschiedenen Arbeitsgängen auf der Baustelle einzubauen sind.
2. Schutzschicht C und D als reine geotextile Schutzlagen, welche zwar aus zwei Komponenten bestehen, die aber - aus zum Teil dem gleichen Grundmaterial, bereits im Werk miteinander verbunden - als ein Bauteil auf der Baustelle ausgelegt werden.
3. Schutzschicht E als Kombination von künstlichen und mineralischen Materialien, die ebenfalls bereits im Werk miteinander fixiert sind und als eine Matte in einem Arbeitsgang ausgebracht werden können. Im Gegensatz zu den Schutzlagen der beiden vorgenannten Kategorien ist das

mechanische Verhalten der Bentonitmatte veränderlich (je nach Wassergehalt des Bentonits).

In Bild 76 ist die Versuchsmatrix dargestellt. In den Symbolen für die Teilversuche sind die im weiteren benutzten Bezeichnungen dieser Versuche wiedergegeben.

5.7.2 Darstellung der Ergebnisse

Die unter der Dichtungsbahn eingelegten Bleche wurden jeweils mit der Raster-Abtastung in einem Intervall von 5 mm vermessen. Bei der Auswertung dieser Daten wurde nur ein Bereich bis zu einem maximalen Abstand von 120 mm zum Mittelpunkt der verformten Probe erfaßt (ϕ 240 mm, 1.793 Werte).

Die wichtigsten Ergebnisse der Auswertung der aufgenommenen Meßwerte sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt. Tabelle 22.1 gibt die maximalen Dehnungen wieder, die für die einzelnen Teilversuche auf der Elastomer-Unterlage ermittelt wurden. Zur Beurteilung des Zustandes der gesamten Probe eignet sich das arithmetische Mittel bzw. der Erwartungswert aus der Menge der für jeden der einzelnen Meßpunkte bestimmten Dehnungen besser, als eine Beurteilung nur nach dem Maximalwert. In Tabelle 22.2 sind daher das arithmetische Mittel, in Tabelle 22.3 der Erwartungswert für die Teilversuche (auf Elastomer) zusammengefaßt.

Da sich die Wirkung der bei dieser Serie verwendeten Bentonitmatte (Schutzlage E) möglicherweise unterscheidet, je nachdem ob die Bentonitfüllung vor der Belastung trocken oder bereits vorgequollen ist, wurden beide Fälle in den Versuchen auf der Elastomer-Unterlage berücksichtigt. Im ersten Fall wurde die Matte trocken eingebaut (Versuche bezeichnet als GEDE1/2). In einer zweiten Reihe erhielt die Bentonitfüllung die Gelegenheit, in einem Wasserbad über 24 Stunden unbelastet zu quellen. Unmittelbar darauf wurden die Proben in den Drucktopf eingebaut und belastet. Die Ergebnisse dieser Versuche mit den vorgequollenen Bentonitmatten sind, als GEDE1vq, bzw. GEDE2vq bezeichnet, ebenfalls in den Tabellen aufgenommen.

***** MAXIMALWERTE *****				
Versuch	max rech Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GEDA1 GEDA2	1,240 0,273	0,637 0,239	25,07 38,90	4,984 3,212
GEDB1 GEDB2	0,369 0,359	0,263 0,180	37,90 69,01	3,298 1,811
GEDC1 GEDC2	3,583 6,014	2,375 4,745	15,59 17,72	8,016 7,051
GEDD1 GEDD2	3,029 4,561	2,911 3,857	18,91 18,81	6,608 6,644
GEDE1 GEDE2	6,487 6,208	4,595 4,205	7,02 14,21	17,80 8,79
GEDE1vq* GEDE2vq*	6,835 4,635	6,081 3,881	13,19 11,80	9,47 10,59

* vq ==> Bentonitmatte vorgequollen

Tabelle 22.1: Maximalwerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Die Abbildungen der verformten Bleche der Versuche GEDA1, GEDB1, GEDC1, GEDD1 und GEDE1 wurden bereits in Abschnitt 5.4.5.3 wiedergegeben (Bilder 58.1 - 58.5).

Die Tabellen 23.1 bis 23.3 beinhalten die Maximalwerte der Dehnungen (23.1), das arithmetische Mittel (23.2) und den Erwartungswert (23.3) der Dehnungen, die den Teilversuchen mit dem mineralischen Untergrund (Schluff) entstammen. Die Schutzlage E (Bentonitmatte) wurde in der Konstellation mit diesem natürlichen Untergrund nicht untersucht.

Aus den Ergebnissen der auf der Elastomer-Unterlage durchgeführten Teilversuche kann eine Bewertung der unterschiedlichen Schutzlagen abgeleitet werden. Die eingesetzten fünf - bzw. bei Bewertung der vorgequollenen Bentonitmatte als separaten Teilversuch sechs - Schutzschichten lassen sich nach den erzielten Ergebnissen in eine der Schutzwirksamkeit entsprechende, recht eindeutige Reihenfolge einordnen.

***** ARITHMETISCHES MITTEL *****

Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GEDA1 GEDA2	0,024 0,029	0,015 0,019	501,6 1058,0	0,0 0,0
GEDB1 GEDB2	0,051 0,036	0,030 0,022	298,0 340,0	- 0,0004 0,0084
GEDC1 GEDC2	0,539 1,019	0,331 0,636	106,4 84,2	- 0,426 - 0,604
GEDD1 GEDD2	0,691 0,795	0,448 0,522	95,1 97,6	- 0,366 - 0,358
GEDE1 GEDE2	1,246 1,080	0,786 0,675	75,8 76,8	- 0,959 - 0,779
GEDE1vq* GEDE2vq*	1,142 0,771	0,741 0,499	100,0 120,1	- 0,584 - 0,296

* VQ ==> Bentonitmatten vorgequollen

Tabelle 22.2: Arithmetisches Mittel bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

5.7.3 Bewertung der Ergebnisse

Wie zu erwarten war, zeigen die beiden Kombinationen aus Vlies und mineralischer Schicht (Schutzlage A und B) die deutlich besten Ergebnisse. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die Maximalwerte als auch bei Betrachtung der beiden, das gesamte Verhalten beschreibenden Werte des arithmetischen Mittels und des Erwartungswertes aus den ermittelten Einzeldehnungen. Untereinander fällt die Abstufung bei Betrachtung der ermittelten maximalen Dehnung und des Erwartungswertes nicht so eindeutig aus, zeigt allerdings in den entsprechenden arithmetischen Mitteln, daß sich für die Vlies/Sand Kombination (Schutzlage A) gegenüber der Vlies/Kies Kombination (Schutzlage B) eine insgesamt noch bessere Schutzwirkung nachweisen läßt.

***** ERWARTUNGSWERT *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GEDA1 GEDA2	0,127 0,045	0,066 0,033	615,4 -	0,417 0,202
GEDB1 GEDB2	0,071 0,055	0,044 0,031	415,9 463,8	0,247 0,181
GEDC1 GEDC2	0,725 1,330	0,457 0,893	169,8 141,6	0,164 0,026
GEDD1 GEDD2	0,840 1,030	0,596 0,732	164,3 165,8	0,132 0,160
GEDE1 GEDE2	1,579 1,401	1,027 0,893	108,8 105,9	0,086 0,092
GEDE1vq* GEDE2vq*	1,512 1,026	1,090 0,709	142,0 285,6	0,102 0,413

* vq ==> Bentonitmatten vorgequollen

Tabelle 22.3: Erwartungswerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

***** MAXIMALWERTE *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GSDA1 GSDA2	0,816 0,841	0,648 0,706	44,83 74,01	2,787 1,688
GSDB1 GSDB2	0,948 0,386	0,676 0,216	51,73 50,80	2,416 2,460
GSDC1 GSDC2	3,274 9,332	3,033 7,950	15,11 20,74	8,267 6,026
GSDD1 GSDD2	4,232 2,933	4,120 2,437	18,45 23,64	6,773 5,287

Tabelle 23.1: Maximalwerte bei mineralischem Untergrund (Schluff)
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 200 mm

***** ARITHMETISCHES MITTEL *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GSDA1	0,170	0,131	2906,0	- 0,133
GSDA2	0,132	0,102	469,5	- 0,077
GSDB1	0,108	0,073	262,3	- 0,065
GSDB2	0,098	0,063	261,9	- 0,044
GSDC1	0,500	0,333	141,5	- 0,134
GSDC2	1,356	0,939	89,32	- 0,439
GSDD1	0,771	0,514	96,0	- 0,216
GSDD2	0,577	0,374	108,1	- 0,142

Tabelle 23.2: Arithmetisches Mittel bei mineral. Untergrund (Schluff)
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 200 mm

***** ERWARTUNGSWERT *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GSDA1	0,210	0,135	-	0,152
GSDA2	0,177	0,140	580,8	0,061
GSDB1	0,160	0,110	338,3	0,176
GSDB2	0,117	0,074	574,6	0,162
GSDC1	0,674	0,506	183,4	0,394
GSDC2	1,867	1,381	109,5	0,051
GSDD1	0,981	0,732	135,4	0,358
GSDD2	0,724	0,505	141,7	0,283

Tabelle 23.3: Erwartungswerte bei mineralischem Untergrund (Schluff)
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 200 mm

Die in dem Teilversuch GEDA1 ermittelte - wie aus der Häufigkeitsverteilung zu ersehen, nur in einem Meßpunkt aufgetretene - maximale rechnerische Dehnung von $\epsilon = 1,24\%$ muß als Ausreißer angesehen werden. Dieser vergleichsweise extreme Wert ist in dem vorliegenden Fall dadurch

verursacht worden, daß der Wegaufnehmer bei der Abtastung der Fläche in eine durch ein zwischen Blech und Dichtungsbahn geratenes Sandkorn verursachte Vertiefung abgesetzt worden ist. Das Blech des Versuches GEDA1 wies, durch Unsauberkeiten beim Einbau, in einem Bereich eine größere Anzahl solcher Korneindrückungen auf.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der entsprechenden, unter Verwendung des mineralischen Untergrundes angelegten Parallelversuche müßte die Wirksamkeit der Schutzlagen A - im Gegensatz zu den Elastomer-Ergebnissen - schlechter eingestuft werden, als die der Schutzlage B. Bei diesen Versuchen scheinen geringfügige Schwankungen beim Einbau des Schluffes, z.B. in bezug auf die Gleichmäßigkeit der Verdichtung und des Wassergehaltes über die Einbaufläche, verantwortlich für diese Ergebnisse zu sein, was sich jedoch im nachhinein nicht mehr feststellen läßt. Derartige geringe Differenzen können jedoch gerade bei einer Auswertung der in diesen Versuchen nur sehr kleinen, visuell an den Proben nicht registrierbaren Unterschieden in den Verformungen, zu einer Verschiebung der eigentlich zu erwartenden Verhältnisse führen.

Die Verbundstoffe (Schutzlagen C und D) zeigen in allen Teilversuchen deutlich schlechtere Schutzwirkungen, als die Vlies/Sand, bzw. Vlies/Kies Kombinationen. Die festgestellten maximalen Dehnungen liegen für die Elastomer-Versuche im Mittel etwa um das 10 bis 12-fache über den mit den Schutzlagen A und B erzielten Werten. Bei den entsprechenden Schluff-Versuchen wurden etwa um das 4 bis 5-fache höhere Maximaldehnungen registriert. Bei Auswertung der arithmetischen Mittelwerte der Dehnungen fällt das Verhältnis noch ungünstiger aus. In bezug auf diese Größen ergeben sich für die Verbundstoffe aus den Elastomer-Versuchen etwa 15 bis 20-fach, aus den Schluff-Versuchen etwa 5 bis 6-fach größere Werte.

Die Abstufung zwischen den Verbundstoffen selbst ($C \Rightarrow 2.000 \text{ g/m}^2$, $D \Rightarrow 3.000 \text{ g/m}^2$) ist nach den Ergebnissen der einzelnen Teilversuche unabhängig vom verwendeten Untergrund nicht so eindeutig vorzunehmen, wie dies aufgrund der unterschiedlichen Flächengewichte der beiden Produkte zu erwarten sein könnte. Erst ein Vergleich der Mittelwerte der entsprechenden Größen aus den beiden jeweils unter gleichen Bedingungen durchgeführten Parallelversuchen zeigt durchgehend eine günstigere Wirkung der Schutzlage D, des schwereren Produktes.

Die Bentonitmatten schneiden in dem Vergleich aller Schutzlagen am ungünstigsten ab, unabhängig davon, ob sie in trockenem Zustand oder bereits vorgequollen eingelegt wurde. Bei Einbau mit dem Verbundstoff zum Kies wurden für die trockene Matte maximale Dehnungen festgestellt, welche etwa um das 15 bis 20-fache über dem Resultat der in diesem Vergleich besten Schutzlagen aus der Kombination Vlies/Sand (Schutzlage A), bzw. Vlies/Kies (Schutzlage B) liegen. Die arithmetischen Mittel der Dehnungen weisen mit 25 bis 35-fach höheren Werten noch stärkere Differenzen auf.

Die in einem Wasserbad vorgequollenen Proben zeigten ein geringfügig günstigeres Verhalten. Dadurch, daß sich durch die Wasseraufnahme eine starke Volumenvergrößerung der Bentonitfüllung einstellte, war eine bessere Lastverteilung als mit der trockenen Bentonitmatten erreichbar. Der beabsichtigte lastverteilende Effekt - ähnlich wie bei einem Luftkissen, Wasserbett - konnte jedoch nicht in vollem Maße erreicht werden. Das Produkt ließ die Ausbildung einer vollständig unter der Kiesschüttung durchgehenden, unter einer quasi hydrostatischen Spannung stehenden Schicht nicht zu. Einige Kieskörner konnten den Bentonitfilm verdrängen, so daß an diesen Stellen jeweils nur noch die Schutzwirkung der beiden geotextilen Deckschichten (Verbundstoff aus Gewebe und Vlies 800 g/m^2 + Vlies 400 g/m^2) zur Verfügung stand. Das durch das aufgenommene Wasser erheblich vergrößerte Volumen des vorgequollenen Bentonites wirkte jedoch soweit, daß sich bei Verwendung der über 24 Stunden vorgequollenen Proben maximale Dehnungen ergaben, welche um den Faktor 0,8 bis 0,9 geringer waren als die Werte, die bei einem trockenen Einbau festgestellt wurden.

Trotz der versuchsbedingt nicht vermeidbaren Schwankungen in den Ergebnissen läßt sich aus dieser Serie eine Rangfolge der verwendeten Schutzlagen ableiten, die - mit allen Einschränkungen - für die gewählte Versuchskonstellation (unter anderem Belastung, Dränagematerial, Untergrund) quantifiziert werden kann. Unter Heranziehung der arithmetischen Mittel der maximalen Dehnungen ergeben sich bei Ansatz der Mittelwerte aus den jeweils unter gleichen Bedingungen durchgeführten Parallelversuchen die in der Tabelle 24 aufbereiteten Unterschiede in der Schutzwirkung. Als Bezugswert wurde das Ergebnis der bei dieser Betrachtungsweise günstigsten Schutzlage A zu 1 gesetzt.

Aus den in der Tabelle 24 aufgeführten Ergebnissen geht hervor, daß eine Differenzierung zwischen verschiedenen Schutzlagen mit dem Zeitstandlastplattendruckversuch in Verbindung mit einem geeigneten Auswertverfahren möglich ist. Eine Unterscheidung der Wirkung verschiedenartiger Schutzlagen scheint bei Einsatz einer Elastomer-Unterlage wesentlich deutlicher zu gelingen, als bei Verwendung eines mineralischen Untergrundes (hier: Schluff). Dieser Unterschied in den von der Art der Unterlage abhängigen Ergebnissen belegt erneut das meßbar andere Verhalten eines natürlichen Untergrundes gegenüber dem empfohlenen Elastomer.

Untergrund	Schutzlage					
	A	B	C	D	E	Evq*
Elastomer	1,0	1,64	29,40	28,04	43,89	36,09
Schluff	1,0	0,68	6,15	4,46	-	-

* vq ==> Bentonitmatte vorgequollen

Tabelle 24: Quantitativer Vergleich der Wirksamkeit der verwendeten Schutzlagen A - E

5.7.4 Bedeutung der Kunststoffdichtungsbahn

Bei der Weiterleitung der quasi punktförmigen Belastung aus den Einzelkörnern der Kiesdränage spielt die Kunststoffdichtungsbahn aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften zwangsläufig ebenfalls eine Rolle als lastverteilendes Element. Welchen Anteil die Dichtungsbahn dabei im Vergleich zu der Wirkung einer geotextilen Schutzlage haben kann, läßt sich beispielhaft aus den in den Tabellen 25.1 bis 25.3 wiedergegebenen Ergebnissen ableiten.

Diese Resultate entstammen drei Versuchen, bei denen die in den Blechen eingepprägten Verformungen ausgewertet wurden, die zum einen bei einem Aufbau ohne Dichtungsbahn jedoch mit Schutzlage C (GEOC1/2), zum anderen mit Dichtungsbahn ohne Schutzlage (GED01/2) auftraten. Diese Ergebnisse

werden zum Vergleich denen aus dem bereits in einem anderen Zusammenhang vorgestellten Versuch mit Dichtungsbahn und Schutzlage C (GEDC1/2) gegenübergestellt. Jeder der Teilversuche wurde auch bei dieser Serie wiederholt, um wegen der unvermeidbaren Streuungen zumindest ein zweites Ergebnis zu erhalten. Diese Versuchsreihe wurde ausschließlich mit der Elastomer-Unterlage gefahren.

	***** MAXIMALWERTE *****			
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GEOC1 GEOC2	19,60 11,89	14,82 8,25	4,82 5,82	25,95 21,47
GEDO1 GEDO2	9,74 9,25	6,43 6,82	8,60 9,90	14,53 12,62
GEDC1 GEDC2	3,583 6,014	2,375 4,745	15,59 17,72	8,016 7,051

Tabelle 25.1: Maximalwerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Tabelle 25.1 zeigt die maximalen Dehnungen, die sich jeweils aus den Meßwerten errechneten. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der für jeden Meßpunkt erfaßten Dehnungen und Krümmungen ist zur besseren Beschreibung des Gesamtverhaltens für das ermittelte arithmetische Mittel in der Tabelle 25.2 und für den Erwartungswert in Tabelle 26.3 wiedergegeben.

Die Kunststoffdichtungsbahn spielt nach diesen Ergebnissen eine bedeutende Rolle bei Weiterleitung der ungleichförmigen Belastung in den Untergrund. Während sich die maximalen Dehnungen gegenüber dem Versuch mit beiden Elementen, Dichtungsbahn und Schutzlage C, bei einem Fehlen der Schutzlage (GEDO1/2) von im Mittel $\max \epsilon_{DC} \approx 4,8 \%$ um etwa das 2-fache auf $\max \epsilon_{DO} \approx 9,5 \%$ vergrößerte, ergab sich bei den Versuchen ohne Dichtungsbahn aber mit Schutzlage C (GEOC1/2) mit $\max \epsilon_{OC} \approx 15,7 \%$ eine Steigerung um etwa den Faktor 3,3.

***** ARITHMETISCHES MITTEL *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GEOC1 GEOC2	3,265 2,898	1,957 1,739	38,73 39,77	- 3,182 - 2,873
GED01 GED02	1,661 1,914	1,004 1,151	54,17 49,85	- 1,678 - 1,925
GEDC1 GEDC2	0,539 1,019	0,331 0,636	106,4 84,2	- 0,426 - 0,604

Tabelle 25.2: Arithmetisches Mittel bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

***** ERWARTUNGSWERT *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
GEOC1 GEOC2	4,260 3,497	2,706 2,152	52,87 52,32	- 1,40 - 1,43
GED01 GED02	2,152 2,372	1,330 1,494	77,48 69,25	- 0,510 - 0,993
GEDC1 GEDC2	0,725 1,330	0,457 0,893	169,8 141,6	0,164 0,026

Tabelle 25.3: Erwartungswerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Ein ähnliches Verhältnis stellt sich auch bei der Betrachtung des arithmetischen Mittels aller erfaßten Dehnungen dar. Bei dem Fehlen der Schutzlage (GED01/2) vergrößerte sich der Wert von im Mittel $\alpha_{\text{DC}} \approx 0,78 \%$ um ca. 130 % auf $\alpha_{\text{D0}} \approx 1,8 \%$. Die Versuche ohne

Dichtungsbahn (GEOC1/2) ergaben demgegenüber mit $\Delta \epsilon_{0C} \approx 3,1 \%$ eine Steigerung der maximalen Dehnungen um etwa 300 %.

Die Steigerungen der maximalen Dehnungen, der arithmetischen Mittel und der Erwartungswerte – bezogen auf die jeweiligen Mittelwerte der Versuche mit Dichtungsbahn und Schutzlage (GEDC1/2) – sind in Bild 77 dargestellt.

Im Vergleich zur Schutzlage C (PEHD-Verbundstoff, 2.000 g/m^2) hat die Dichtungsbahn bei den untersuchten Bedingungen einen ca. doppelt so hohen Einfluß auf die Größe der sich einstellenden Verformungen wie der Verbundstoff. Etwa gleiche Verhältnisse lassen sich auch bei einer entsprechenden Auswertung der Erwartungswerte der Dehnungen feststellen. Diese Aussage läßt sich zwar nicht generalisieren, zeigt aber deutlich die mittragende Rolle des gegenüber einem Geotextil vergleichsweise dehn- und biegesteifen Flächenelementes Kunststoffdichtungsbahn.

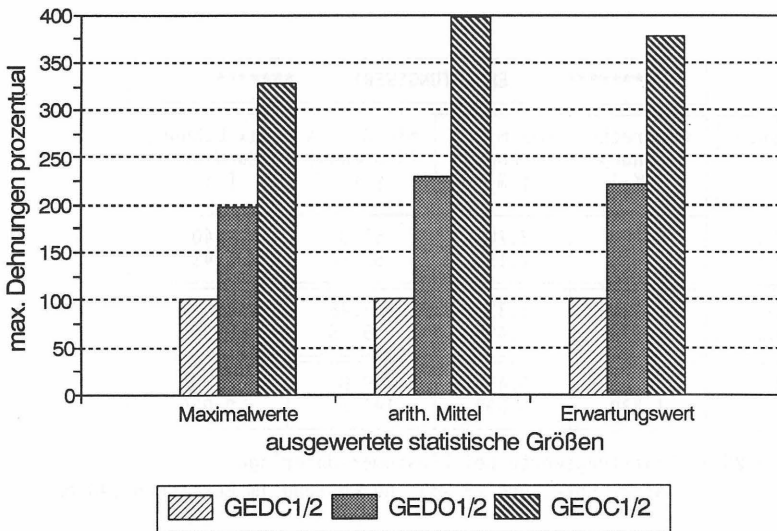


Bild 77: Vergleich der Wirkung der Dichtungsbahn und der Schutzlage C

Der Anteil der Dichtungsbahn bei der Lastabtragung wird umso bedeutender, je größer die Verformungen sind, die sich insgesamt aus der jeweiligen Last/Schutzlage/Untergrund-Konstellation ergeben.

5.8 Versuche mit künstlichen Belastungsbildern

5.8.1 Versuchsbedingungen und Versuchsmatrix

Die Unregelmäßigkeiten der losen Kiesschüttung mit den daraus bedingten zufälligen Belastungsbildern erschweren die Beurteilung der Wirkung einer Schutzlage. Besonders bei Eignungsprüfungen durch wenige oder gar nur einen einzigen Versuch ergeben sich aus diesen versuchsbedingten Schwankungen erhebliche Unsicherheiten. Um derartige Effekte auszuschließen, wurden bei den im folgenden beschriebenen Zeitstandlastplattendruckversuchen der Drainagekies deshalb durch Körper ersetzt, die eine bekannte, gut beschreibbare Form besitzen. Durch eine so geschaffene, über mehrere Teilversuche vergleichbare Belastung soll am Beispiel der als Schutzlagen C und D bereits beschriebenen Verbundstoffe untersucht werden, welche registrierbaren Unterschiede sich in der Wirkung der Schutzschichten feststellen lassen.

Für einen Teil der Versuchsreihe wurden Kugeln statt des Kieselso eng wie möglich in einer Lage auf der Schutzschicht plazierte und unmittelbar über die Lastverteilungsplatte belastet. Bei jedem Versuch kamen nur Kugeln gleichen Durchmessers zum Einsatz. Als Kugeldurchmesser wurden $\phi 22$ mm und $\phi 32$ mm gewählt. In zur Absicherung je zwei parallelen Versuchen wurde der Aufbau mit der einer Spannung von 1 MN/m^2 entsprechenden Last beaufschlagt. Alle Versuche wurden einmal mit der Schutzlage C (Verbundstoff 2.000 g/m^2) und einmal mit der Schutzlage D (Verbundstoff 3.000 g/m^2) durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug immer 48 Stunden.

Die Wahl der Kugeldurchmesser orientierte sich an den Verhältnissen der Körnung 16/32 mm. Die Kugeln $\phi 22$ mm repräsentieren dabei in etwa den mittleren Durchmesser der Drainagekörnung, während die Kugeln $\phi 32$ mm das Größtkorn simulieren sollen, wobei nicht berücksichtigt ist, daß plattige Kornformen einen Abstand < 32 mm erwarten lassen.

Für weitere Versuche wurde die Kiesschüttung durch eine starre Platte ersetzt, die ein rotationssymmetrisches Relief aufweist. Bild 78 zeigt einen Schnitt durch diese Platte. Die kreisförmig, mit einem lichten Abstand von 20 mm angeordneten, je 20 mm breiten Profile haben insgesamt

eine Höhe von 15 mm und sind abgerundet (Radius 10 mm). Als Schutzschichten dienten wieder die bereits bekannten Verbundstoffe, Schutzlage C und D.

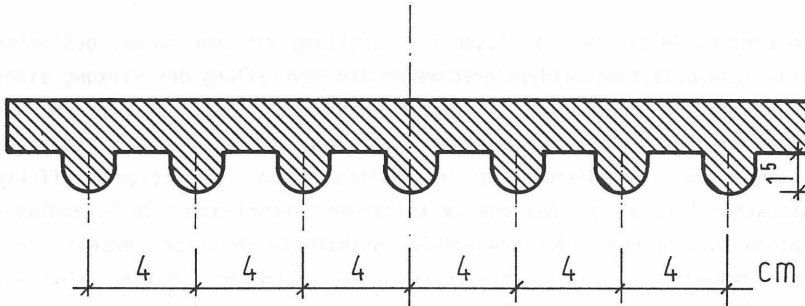


Bild 78: Reliefplatte, Schnitt

Bei sämtlichen Versuchen mit den künstlichen Belastungsbildern wurde ausschließlich die Elastomer-Unterlage verwendet. Die gesamte Versuchsmatrix mit den Bezeichnungen der Einzelversuche ist in Bild 79 dargestellt.

5.8.2 Darstellung der Ergebnisse

5.8.2.1 Kugeln

Die bei allen Versuchen unter der 2,5 mm PEHD-Dichtungsbahn eingelegten Bleche wurden in einem 5 mm Raster abgetastet. Eine Darstellung der registrierten, verformten Oberflächen des jeweils ersten Parallelversuches mit den Kugeln als Belastungskörper zeigen die Bilder 80.1 bis 80.4.

Die aus den Meßwerten abgeleiteten Ergebnisse sind für die Versuche mit den Kugeln beider Durchmesser in den Tabellen 26.1 bis 26.3 zusammengestellt.

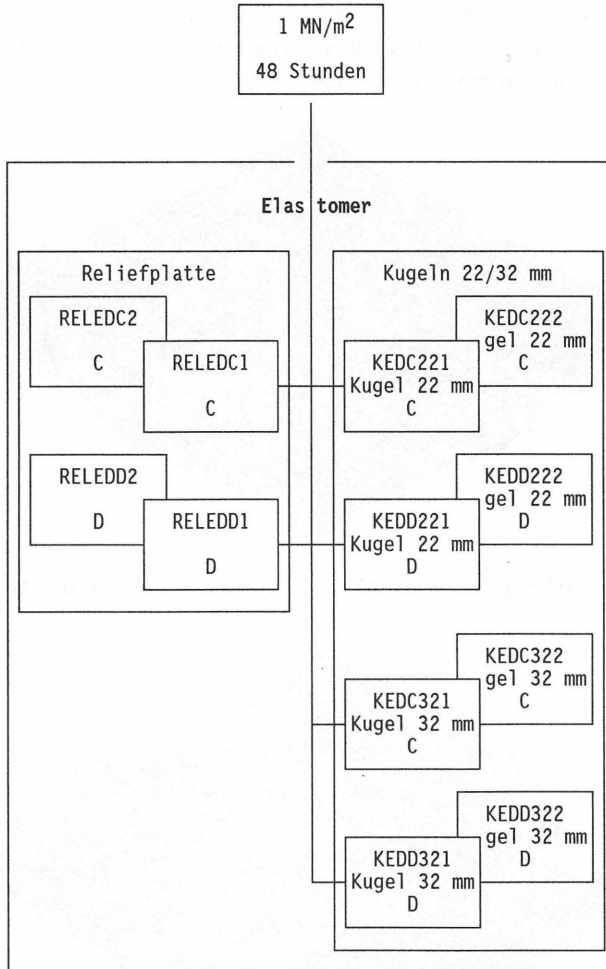


Bild 79: Versuchsmatrix der Versuche mit künstlichen Belastungsbildern

Aus den Ergebnissen lassen sich deutliche Unterschiede in der Wirkung sowohl der beiden geotextilen Schutzlagen als auch der gewählten Kugeldurchmesser (Körnung) erkennen. Die mit 3.000 g/m² schwerere Schutzlage D zeigt bei einem Vergleich der Mittelwerte der in Tabelle 26.2 zusammengestellten arithmetischen Mittel der maximalen rechnerischen Dehnungen der Versuche mit den Kugeln ϕ 22 mm um einen

Faktor $\approx 1,8$ geringere Werte, als sie für Schutzlage C festgestellt wurden. Die Versuche mit den größeren Kugeln $\phi 32$ mm ergaben demgegenüber einen Unterschied um den Faktor $\approx 1,4$.

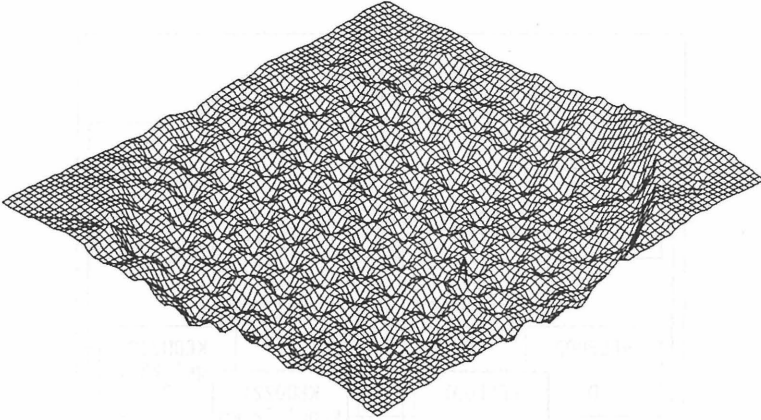


Bild 80.1: Abbildung der Probe KEDC221 (10-fach überhöhte Darstellung)

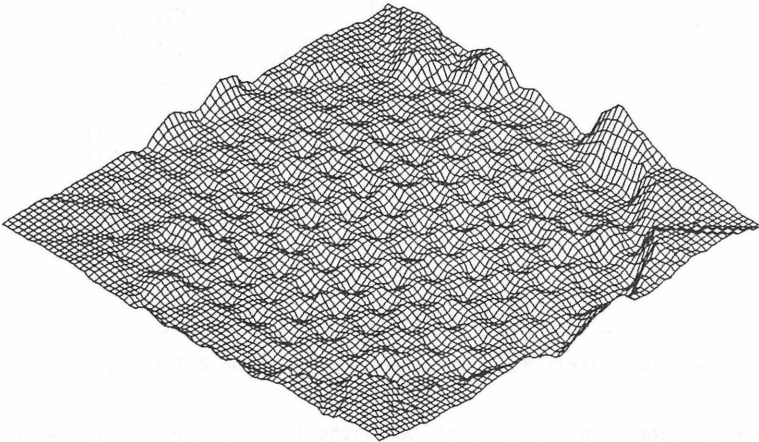


Bild 80.2: Abbildung der Probe KEDD221 (10-fach überhöhte Darstellung)

Die jeweils unter den gleichen Bedingungen durchgeführten Parallelversuche zeigen vergleichsweise gute Übereinstimmungen. Eine

Ausnahme bildet der Versuch KEDC221, bei dem die festgestellte maximale Dehnung mit $\epsilon = 6,22 \%$ als Ausreißer angesehen werden muß.

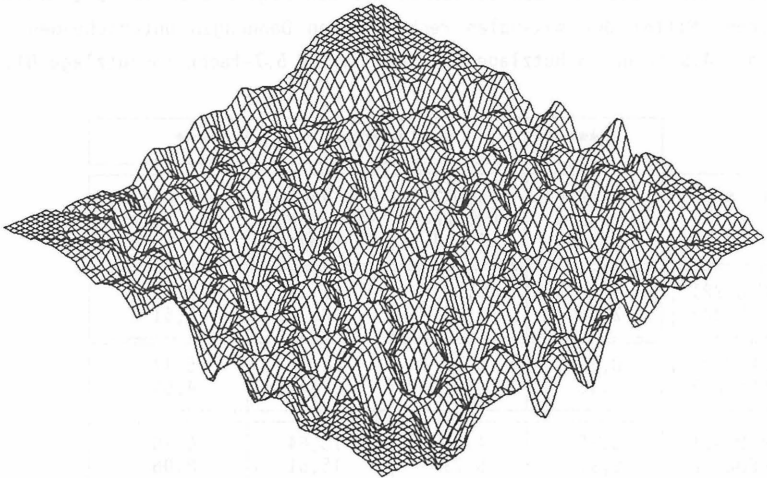


Bild 80.3: Abbildung der Probe KEDC321 (10-fach überhöhte Darstellung)

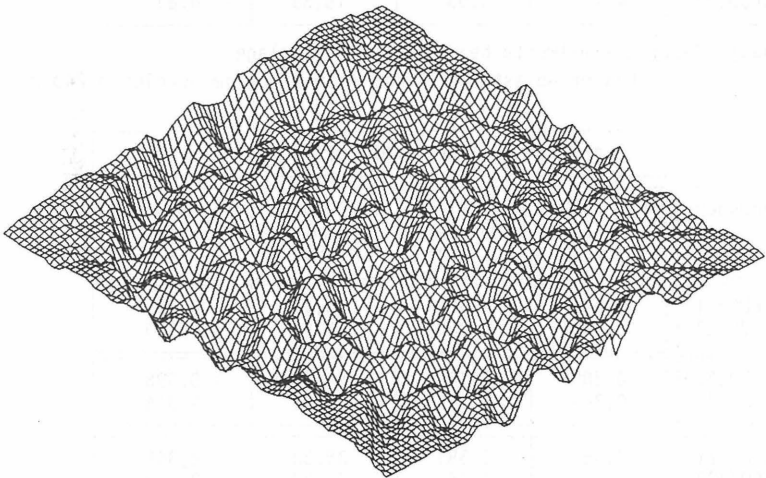


Bild 80.4: Abbildung der Probe KEDD321 (10-fach überhöhte Darstellung)

Die verwendeten unterschiedlichen Kugeldurchmesser wirken sich erheblich in den Maximal- und den Mittelwerten der aus den Meßwerten abgeleiteten Verformungen aus. Bei einer Belastung über die Kugeln $\phi 32$ mm werden

maximale Dehnungen registriert, die für die Schutzlage C (2.000 g/m^2) im Mittel um den Faktor 3,2, für die Schutzlage D (3.000 g/m^2) um etwa 4,5 größer sind, als bei den Versuchen mit den Kugeln $\phi 22 \text{ mm}$. Die arithmetischen Mittel der maximalen rechnerischen Dehnungen unterscheiden sich um das 4,5-fache (Schutzlage D), bzw. um das 5,7-fache (Schutzlage D).

***** MAXIMALWERTE *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
KEDC221 KEDC222	6,22 2,06	5,06 1,56	11,12 22,26	- 11,23 - 5,61
KEDD221 KEDD222	0,89 1,18	0,70 0,91	24,16 27,47	- 5,17 - 4,55
KEDC321 KEDC322	6,35 6,91	4,90 6,13	18,64 15,51	- 6,70 - 8,06
KEDD321 KEDD322	4,56 4,73	3,72 3,99	20,92 18,29	- 5,97 - 6,83

Tabelle 26.1: Maximalwerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich $\phi 240 \text{ mm}$

***** ARITHMETISCHES MITTEL *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
KEDC221 KEDC222	0,608 0,482	0,352 0,280	59,09 69,41	- 0,959 - 0,759
KEDD221 KEDD222	0,289 0,304	0,166 0,195	84,50 82,09	- 0,398 - 0,314
KEDC321 KEDC322	2,589 2,352	1,585 1,463	36,58 39,29	- 2,362 - 2,103
KEDD321 KEDD322	1,623 1,797	1,005 1,121	46,95 44,35	- 1,517 - 1,789

Tabelle 26.2: Arithmetisches Mittel bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich $\phi 240 \text{ mm}$

***** ERWARTUNGSWERT *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
KEDC221 KEDC222	0,920 0,588	0,608 0,357	75,61 82,94	- 0,086 - 0,301
KEDD221 KEDD222	0,328 0,387	0,201 0,241	97,54 97,35	- 0,006 - 0,057
KEDC321 KEDC322	2,902 2,688	1,819 1,769	40,72 44,65	- 1,750 - 1,466
KEDD321 KEDD322	1,834 2,027	1,188 1,315	55,24 50,14	- 0,977 - 1,239

Tabelle 26.3: Erwartungswerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Die sich bei den größeren Kugeln einstellenden, stärkeren Verformungen resultieren aus der mit zunehmendem Durchmesser steigenden Belastung der einzelnen Kugel. Eine Spannung von 1 MN/m^2 bedeutet (bei ≈ 1.130 Kugeln/ m^2) für Kugeln ϕ 32 mm eine Belastung von ca. 0,9 kN/Kugel, gegenüber etwa 0,4 kN/Kugel für Kugeln ϕ 22 mm (bei ≈ 2.400 Kugeln/ m^2). Aus dem Zusammenwirken zwischen der gut doppelt so hohen Belastung bei einem gleichzeitig weiteren Abstand zwischen den Aufstandspunkten (32 mm gegenüber 22 mm) ergeben sich letztlich die je nach Schutzlage im Mittel 4 - 5-fach größeren Dehnungen.

5.8.2.2 Reliefplatte

Exemplarisch für die mit der Reliefplatte hervorgerufenen Verformungen sind die deformierten Bleche aus den jeweils ersten der mit den Schutzlagen C und D durchgeführten Parallelversuchen in Bild 81.1 (RELEDC1) und Bild 81.2 (RELEDD1) dargestellt.

Als Ergebnisse der Reliefplatten-Versuche sind in der Tabelle 27.1 die maximalen Dehnungen, in Tabelle 27.2 das arithmetische Mittel aus den für

jeden Meßpunkt ermittelten Dehnungen und in Tabelle 27.3 der Erwartungswert aus diesen Dehnungen wiedergegeben.

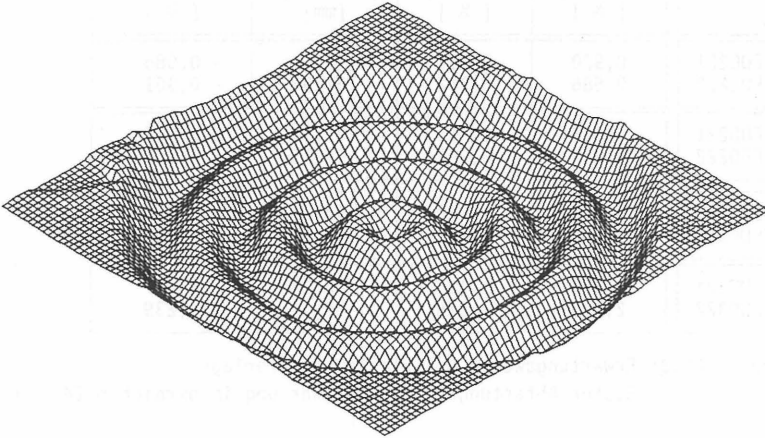


Bild 81.1: Abbildung der Probe RELEDC1 (10-fach überhöhte Darstellung)

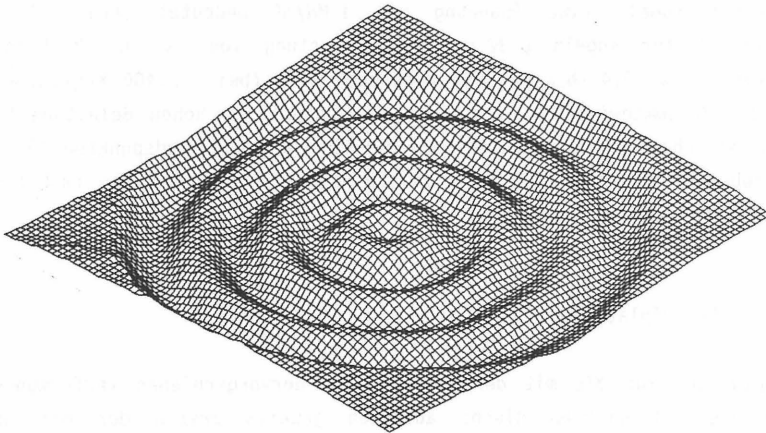


Bild 81.2: Abbildung der Probe RELEDD1 (10-fach überhöhte Darstellung)

Im Unterschied zu einer Kiesschüttung ist bei einer Belastung über eine Reliefplatte eine Verschiebung der Lasteinleitungspunkte ausgeschlossen. Eine Wechselwirkung zwischen Untergrund und den lastweiterleitenden Elementen kann nicht entstehen. In den aufgelisteten Ergebnissen ist dies

an der guten Übereinstimmung zwischen den beiden jeweiligen Parallelversuchen erkennbar. Die um den Faktor 2,4 differierenden Werte der maximalen Dehnungen, welche für die beiden eingesetzten Geotextilien ermittelt wurden, spiegeln den größtmäßig erfaßbaren Unterschied in der Wirkung der Schutzlagen wider, welcher allerdings nur für genau die verwendete Last-Untergrund-Konstellation gilt.

***** MAXIMALWERTE *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
RELEDC1 RELEDC2	1,678 1,434	1,398 1,212	27,84 26,12	- 4,49 - 4,78
RELEDD1 RELEDD2	0,622 0,670	0,493 0,544	43,10 43,94	- 2,90 - 2,84

Tabelle 27.1: Maximalwerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

***** ARITHMETISCHES MITTEL *****				
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
RELEDC1 RELEDC2	0,738 0,757	0,478 0,488	123,9 123,6	- 0,288 - 0,368
RELEDD1 RELEDD2	0,266 0,245	0,172 0,157	196,3 205,7	0,008 - 0,009

Tabelle 27.2: Arithmetisches Mittel bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

Die das Verhalten über die gesamte Fläche beschreibenden Parameter (Mittel- und Erwartungswert) lassen sich in diesem Fall wegen der Art der Profilierung der Platte (rotationssymmetrisch) zu einem aussagekräftigen Vergleich mit den anderen Versuchen nicht ohne weiteres heranziehen.

Die Belastung mit der rotationssymmetrischen Reliefplatte, die von der Größe und Ausbildung der Wülste (Radius 10 mm) in etwa den Kugeln ϕ 22 mm ähnlich ist, verursacht maximale Verformungen, die unabhängig von der Schutzlage etwa um den Faktor 1,5 geringer ausfallen, als bei einer Belastung über die Kugeln.

	***** ERWARTUNGSWERT *****			
Versuch	max rechn Dehnung [%]	max mittl Dehnung [%]	min Radius (Krümmung) [mm]	max Dehnung Randfaser [%]
RELEDC1	0,816	0,542	236,1	0,125
RELEDC2	0,823	0,546	306,0	0,078
RELEDD1	0,299	0,196	354,9	0,270
RELEDD2	0,276	0,184	358,3	0,245

Tabelle 27.3: Erwartungswerte bei Elastomer-Unterlage
Raster-Abtastung (5 mm), Auswertung im Bereich ϕ 240 mm

5.8.3 Zusammenfassende Bewertung

Bei der vorstehend dargestellten Versuchsreihe wurde das im Zeitstandlastplattendruckversuch üblicherweise in Form einer Kiesschüttung aufgebraachte Belastungsbild durch Verwendung von Kugeln gleicher Größe und einer Reliefplatte immer weiter abstrahiert. Auf diese Weise können Zufälligkeiten, welche bei Verwendung einer losen Schüttung ungleichförmiger Körner zwangsläufig auftreten und eine Streuung in den Ergebnissen nach sich ziehen, eliminiert werden. Bei der Einführung von Vereinfachungen ist darauf zu achten, daß eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den abstrahierenden Versuchen auf die tatsächliche Situation gewahrt bleibt. Bei den beschriebenen Versuchsserien war dies durch die Wahl der Kugelabmessungen bei einer sonst unveränderten Versuchsdurchführung im wesentlichen gegeben.

Anhand der in der Tabelle 28 zusammengestellten Werte lassen sich die Auswirkungen der verschiedenen Belastungsbilder auf die Maximalwerte und Mittelwerte miteinander vergleichen. Die wiedergegebenen Größen stellen

jeweils den Mittelwert aus den beiden Parallelversuchen dar. Zur Vereinfachung wurden in diese Auflistung nur Belastungsversuche aufgenommen, die auf Elastomer-Unterlagen durchgeführt worden sind. Die Wahl der beiden Schutzlagen C und D gewährleistete bei der eingestellten Belastung gut meßbare und in ihrer Größe voneinander unterscheidbare Verformungen.

	Kies 16/32	Kugel ϕ 22 mm	Kugel ϕ 32 mm	Relief- platte
Mittlerer Maximalwert, maximale rechnerische Dehnung [%]				
Schutzlage C (Verbundstoff 2.000 g/m ²)	4,80	2,06	6,63	1,55
Schutzlage D (Verbundstoff 3.000 g/m ²)	3,80	1,04	4,65	0,65
Mittleres arithmetisches Mittel, maximale rechnerische Dehnung [%]				
Schutzlage C (Verbundstoff 2.000 g/m ²)	0,78	0,55	2,47	0,75
Schutzlage D (Verbundstoff 3.000 g/m ²)	0,74	0,30	1,71	0,26
Mittlerer Erwartungswert, maximale rechnerische Dehnung [%]				
Schutzlage C (Verbundstoff 2.000 g/m ²)	1,03	0,75	2,80	0,82
Schutzlage D (Verbundstoff 3.000 g/m ²)	0,94	0,36	1,93	0,29

Tabelle 28: Vergleich der Wirkung verschiedener Belastungskörper

Bild 82 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für die maximale rechnerische Dehnung graphisch aufbereitet.

Aus einem Vergleich der Werte geht hervor, daß mit keinem der verwendeten künstlichen Belastungsbilder Effekte erreicht wurden, die dem Kies 16/32 unmittelbar entsprechen. Ein besonders auffälliger Unterschied zwischen der Auswirkung einer Belastung durch Kies oder durch die künstlichen Belastungsbilder ist die vergleichsweise geringe Differenz in den Ergebnissen bei den mit Kies auf der Schutzlage C und auf der Schutzlage D durchgeführten Versuchen. Dagegen zeigen sich sowohl bei

Verwendung von Kugeln als auch bei einer Belastung über die Reliefplatte deutlichere Unterschiede zwischen diesen beiden Schutzlagen.

Die Auswirkungen der für die hier vorgestellten Betrachtungen als maßgebend angenommenen Körnung 16/32 lassen sich im Blick auf die zu erwartende Extrembelastung (worst case) und die zur Beurteilung des Gesamtverhaltens besser bewertbare - über die gesamte Fläche gesehene - mittlere Belastung nicht mit einem einzigen, reduzierten Belastungsbild erfassen. Vor diesem Hintergrund sind die Verformungen auszuwerten, die bei den Versuchen mit den zwei Kugelgrößen registriert wurden.

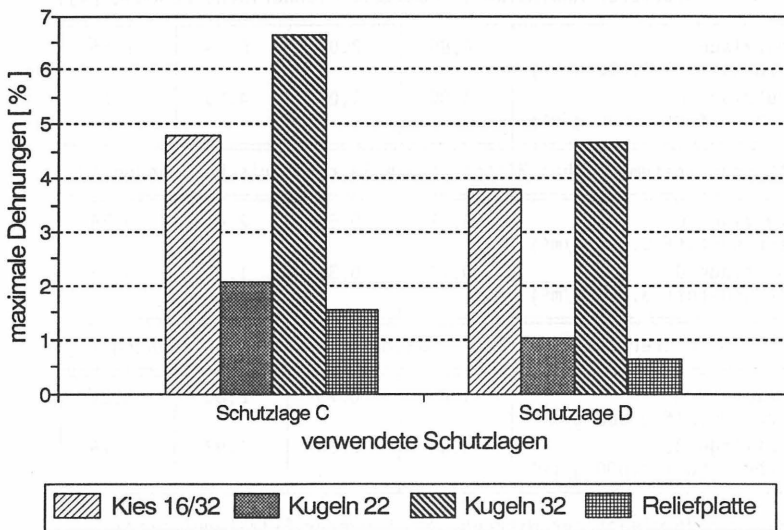


Bild 82: Maximale rechnerische Dehnung bei verschiedenen Belastungskörpern

Der Kugeldurchmesser von ϕ 32 mm scheint nach den Ergebnissen etwas zu groß gewählt, um die einem Kies 16/32 entsprechende maximale Verformung hervorrufen zu können. Die Mittelwerte der Dehnungen aus diesem Versuch müssen naturgemäß größer sein, als die bei Verwendung einer Körnung 16/32, welche einen hohen Anteil günstiger wirkender, kleinerer Körner enthält. Zur Simulation dieses mittleren Verhaltens eines Kiesel 16/32 erscheint der Durchmesser der Kugeln ϕ 22 mm zu klein. Die arithmetischen Mittel der für jeden Meßpunkt errechneten Dehnungen liegen sowohl bei

Einsatz der Schutzlage C als auch der Schutzlage D unter den entsprechenden Werten der maßgebenden Kiesschüttung 16/32.

Bei den vorgestellten Beispielen sollten mit naheliegenden vereinfachten Belastungsbildern erste Möglichkeiten zur Abstrahierung der komplizierten Belastung und der damit einhergehenden Vereinfachung der Versuchsdurchführung und -auswertung untersucht werden. Aus den Ergebnissen läßt sich unmittelbar keine, einer allen Belangen gerecht werdende Ausbildung des Belastungsbildes ableiten. Für die Simulierung einer Beanspruchung, die ungefähr den mittleren Dehnungen infolge einer Belastung durch eine Körnung 16/32 entspricht, könnten nach den Resultaten jedoch annähernd Kugeln mit einem Durchmesser ϕ 24 mm geeignet sein. Der durch diese Abmessung erzwungene Abstand (24 mm) entspricht dem mittleren Abstand, bei Annahme einer idealisiert aus Kugeln 16/32 bestehenden Schüttung.

Die Formgebung eines einzelnen, allgemeingültigen, vereinfachten Belastungskörpers, bei dessen Anwendung eine weniger aufwendige Auswertung erforderlich würde, der darüberhinaus individuelle Wirkungen der verwendeten Schutzlagen in einem ausreichenden Maße erkennen lassen soll, ist, wie den vorgestellten Ergebnissen entnommen werden kann, äußerst schwierig. Die Ausbildung des Reliefs müßte danach ausgerichtet sein, ob der in seiner tatsächlich zu erwartenden Form nur schwer definierbare "worst case" untersucht werden soll oder ob das mittlere Verhalten als Bewertungskriterium dienen kann. Die Übertragbarkeit auf die wirkliche Situation leidet zwangsläufig immer dann, wenn feste Belastungsbilder mit fixierten Belastungspunkten oder -linien eingesetzt werden, da eine - das Ergebnis stark bestimmende - mögliche gegenseitige Beeinflussung zwischen Belastung und Untergrundeigenschaften verloren geht.

Der Belastungsversuch wird bei der Verwendung künstlicher Belastungsbilder somit zu einem reinen Indexversuch, mit dem eine Kenngröße für eine bestimmte Last/Schutzlagen-Kombination ermittelt werden kann. Der Bezug dieser Größe zur tatsächlichen Situation muß bei einem solchen Vorgehen durch entsprechende andere Versuchsreihen, über deren Ergebnisse sich die Aussagekraft des Indexversuches einordnen lassen könnte, hergestellt werden.

5.9 Gesamtbewertung der Ergebnisse

5.9.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der unter den unterschiedlichsten Aspekten durchgeführten Versuchsserien lassen insgesamt Rückschlüsse auf die Wirkungen einzelner Komponenten zu. Unter den Veränderlichen des Zeitstandlastplattendruckversuches sind die Parameter

- => Prüfdauer
- => Prüftemperatur
- => Art der Schutzlage
- => Art des Untergrundes

unmittelbar beeinflussbare und genau kontrollierbare Größen. Im Gegensatz dazu beinhalten die Parameter

- => Prüflast
- => Korngröße der Dränageschicht
- => Belastungsbild durch Kornanordnungen des Kiesel
- => Homogenität des Untergrundes
(bei Verwendung eines mineralischen Materials)

Unwägbarkeiten, die zwangsläufig zu Streuungen in den Versuchsergebnissen führen müssen. Die letztlich im Übergang vom Kies zur Schutzschicht (Dichtungsbahn) wirksame Prüflast variiert infolge unvermeidbarer Randverspannungen in Verteilung und Größe. Die tatsächlich auf die Dichtungsbahn einwirkenden Korngrößen aus dem gesamten Angebot des Drainagekiesel ergeben sich, sowohl was die maximale als auch was die mittlere Belastung angeht, bei losen Schüttungen zufällig. Neben der Korngröße spielt bei diesen Betrachtungen auch die in ihrem zufälligen Auftreten nicht beeinflussbare Kornanordnung und Kornform eine Rolle. Des weiteren sind bei Verwendung eines mineralischen Untergrundes Schwankungen der mechanischen Eigenschaften innerhalb der zur Verfügung stehenden Prüffläche hinzunehmen, die das Ergebnis in einem gewissen Maße beeinflussen. Das Ausmaß der hieraus entstehenden Streuungen hängt von der Qualität des Einbaus und vom Material selbst ab.

Im folgenden werden die aus den Ergebnissen der vorstehend aufgeführten Versuche herauslesbaren Einflüsse der beeinflussbaren und kontrollierbaren Größen zusammengefaßt und - soweit möglich - in ihren feststellbaren Auswirkungen beschrieben.

5.9.2 Prüfdauer

Die Prüfdauer, d.h. die Zeit, über die der Prüfling der Belastung ausgesetzt ist, spielt wegen der beim Zeitstandlastplattendruckversuch eingesetzten Materialien eine bedeutende Rolle. Gerade die Elemente, deren Wirkung bzw. Schädigung geprüft werden soll, bestehen aus Materialien, die insgesamt, besonders aber in ihrem mechanischen Verhalten, zeitabhängig reagieren.

Die im Deponiebau praktisch ausschließlich eingesetzten Kunststoffe Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) sind viskoelastische Materialien, bei denen erzeugte Spannungen sowohl von dem Maß der Verformung als auch von der Verformungsgeschwindigkeit abhängig sind. Die viskosen Eigenschaften führen dazu, daß durch erzwungene Deformationen erzeugte Spannungen in den Kunststoffen im Laufe der Zeit relaxieren. Für den Zeitstandlastplattendruckversuch bedeutet dieses Verhalten eine fortlaufende Veränderung des Gleichgewichts in dem Tragsystem Kies-Schuttlage/Dichtungsbahn-Untergrund. Die bei dem Lastabtrag mitwirkenden Kunststofflagen Schuttlage/Dichtungsbahn verlieren durch die Relaxationsvorgänge im Verlauf der Zeit einen Teil ihrer Wirkung, was zu Umlagerungen bei der Lastableitung über das Korngerüst des Kiesel in den Untergrund führt. Durch diese Vorgänge stellen sich – besonders zu Beginn der Belastung – weitere Deformationen ein, die Spannungen relaxieren erneut usw.. Mit längerer Versuchszeit ergeben sich wegen dieses Materialverhaltens daher größere Verformungen, deren Zuwachs allerdings immer weiter abklingt. Nach einem ausreichend langen Zeitraum geht der Teil der Trag- und Schuttwirkung, welcher auf einer Zugfestigkeit der Kunststoffe beruht, wegen der Relaxationsvorgänge gegen Null.

Eine zeitabhängige Veränderung kann darüber hinaus noch wegen der Eigenschaften des verwendeten Untergrundes eintreten. Die eingesetzten Elastomere sind ebenfalls Kunststoffe, die ein zeitabhängiges Verhalten zeigen. Kriecherscheinungen – d.h. bei konstanter Spannung nimmt die Dehnung mit der Zeit zu – führen dazu, daß die belasteten Bereiche ausweichen. Ein solches Verhalten zieht grundsätzlich eine Verstärkung der ursprünglichen Deformationen nach sich. Bei einer nur sehr geringen Dicke der Elastomerplatte kann dies jedoch zu Lastumlagerungen führen, die sich in ihren Auswirkungen unter Umständen in einer Vergleichmäßigung

(Abschwächung) der in dem eingelegten Blech feststellbaren Dehnungen bemerkbar machen.

Bei feinkörnigen Böden setzen unter Belastung Konsolidationsvorgänge ein, die zu vergleichsweise größeren Setzungen in den stärker beanspruchten Bereichen führen.

In den bereits vorgestellten Versuchsserien wurde der Einfluß der Belastungszeit nicht systematisch untersucht. Es können daher in diesem Zusammenhang exemplarisch lediglich die Ergebnisse zweier Versuchsreihen vorgestellt werden, die zur Erbringung des Schutzwirksamkeitsnachweises für konkrete Bauvorhaben am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig durchgeführt worden sind.

Bei dem als "Beispiel 1" titulierten Versuch wurde die Wirksamkeit eines PEHD-Verbundstoffes mit einem Flächengewicht von ca. 2.000 g/m^2 gegenüber einem Kies 16/32 mm getestet. Als Prüflast wurde die einer Spannung von $0,9 \text{ MN/m}^2$ entsprechenden Belastung eingestellt. Es wurde je ein Teilversuch mit einer Prüfdauer von 10 Std., 100 Std. und 1.000 Std. durchgeführt. Die drei Teilversuche fanden auf einem mineralischen Untergrund (Schluff, bereits in Abschnitt 5.5 vorgestellt) statt. Das zeitabhängige Verhalten kann den folgenden Darstellungen entnommen werden. Die aufgenommenen Verformungen und die daraus errechneten Dehnungen sind in den Bildern 83.1 - 85.2 wiedergegeben.

Für den im weiteren als "Beispiel 2" bezeichneten Versuch wurde die Schutzwirksamkeit eines PEHD-Verbundstoffes mit einem Flächengewicht von ca. 2.800 g/m^2 gegenüber einem Kies 16/32 mm untersucht. Als Prüflast wurde die einer Spannung von $1,0 \text{ MN/m}^2$ entsprechenden Belastung eingestellt. Auch in diesem Fall wurde je ein Teilversuch mit einer Prüfdauer von 10 Std., 100 Std. und 1.000 Std. gefahren. Bei den drei Teilversuchen wurde ein Elastomer, Härte 50⁰ Shore - A, als Untergrund eingesetzt. Das zeitabhängige Verhalten dieser Versuchsreihe kann aus den folgenden Graphiken ersehen werden. Die aufgenommenen Verformungen und die daraus errechneten Dehnungen sind in den Bildern 86.1 - 88.2 wiedergegeben.

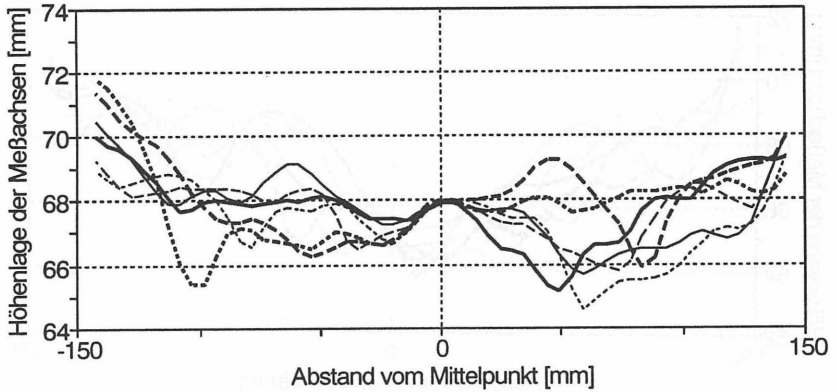


Bild 83.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 1
(Untergrund: Schluff; Belastungsdauer: 10 Stunden)

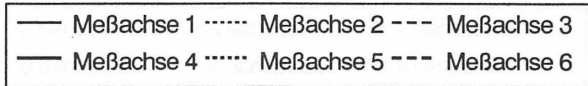
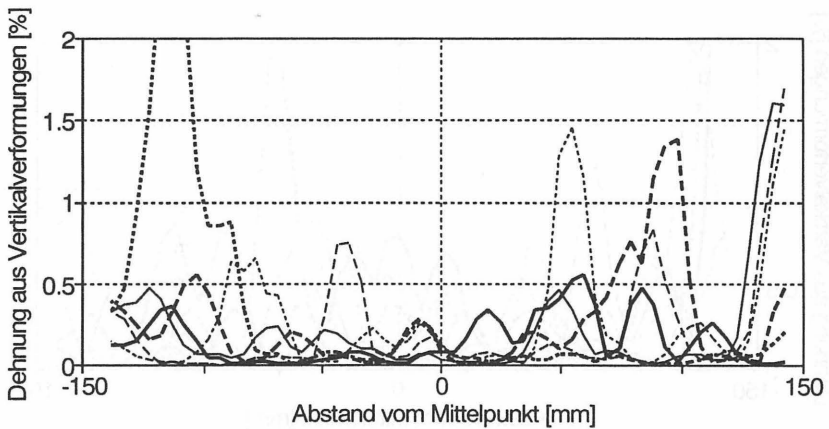


Bild 83.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 1
(Untergrund: Schluff; Belastungsdauer: 10 Stunden)

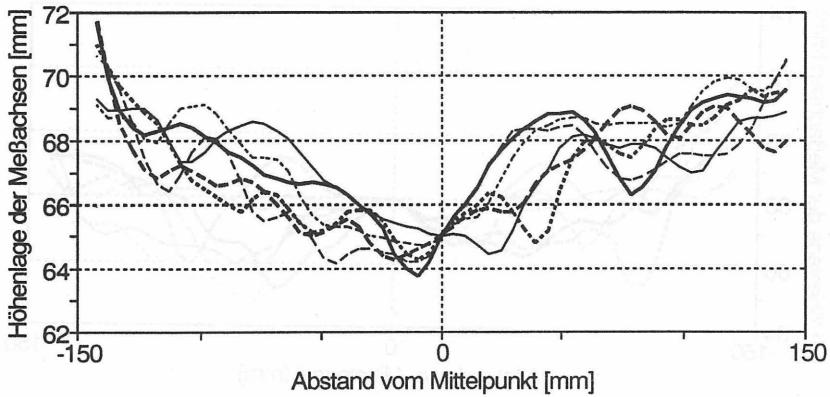


Bild 84.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 1
(Untergrund: Schluff; Belastungsdauer: 100 Stunden)

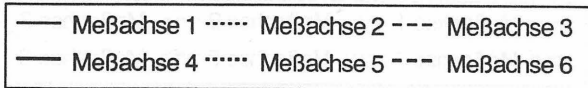
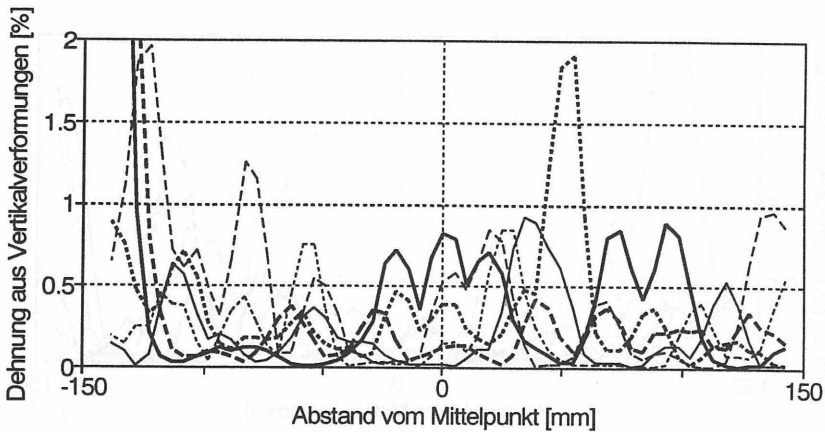


Bild 84.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 1
(Untergrund: Schluff; Belastungsdauer: 100 Stunden)

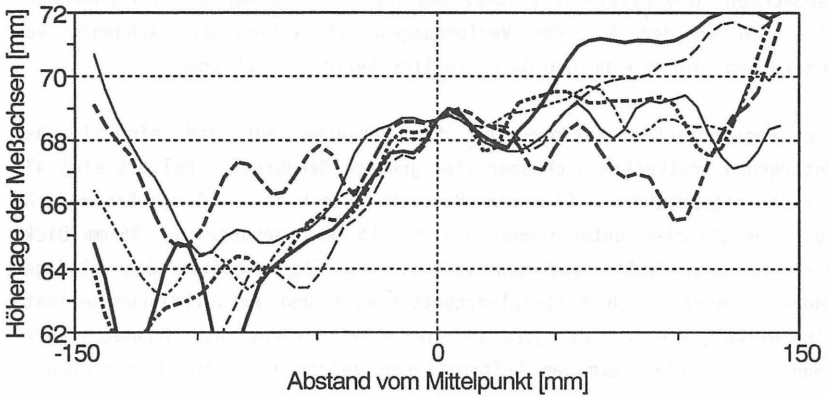


Bild 85.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 1
(Untergrund: Schluff; Belastungsdauer: 1.000 Stunden)

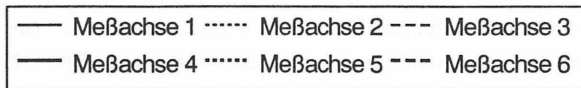
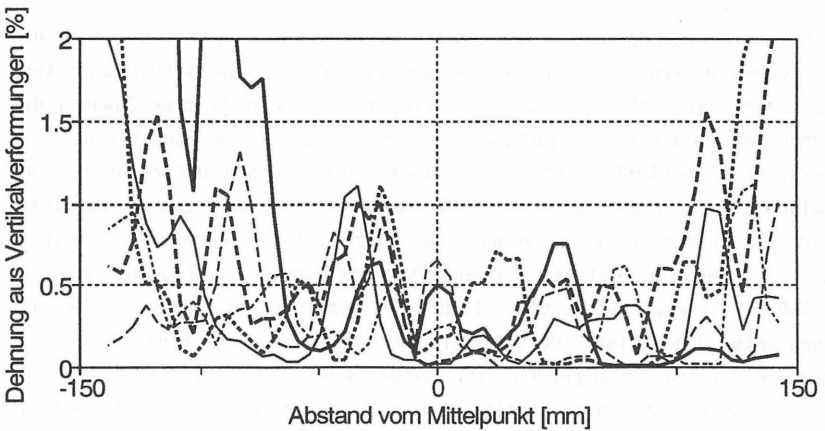


Bild 85.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 1
(Untergrund: Schluff; Belastungsdauer: 1.000 Stunden)

Bei beiden Versuchsreihen läßt sich mit steigender Belastungsdauer eine Zunahme der Verformungen und der sich daraus errechnenden Dehnungen

beobachten. Die zeitliche Entwicklung sowohl im Ausmaß der Veränderungen als auch in der Art der Verformungen ist allerdings, abhängig vom Untergrund, für die beiden dargestellten Serien verschieden.

Die registrierten Verformungen der Versuche auf dem mineralischen Untergrund erstrecken sich über eine größere Bandbreite (Relieftiefe) als die der entsprechenden Elastomer-Versuche. Wegen der größeren Einbaudicke des mineralischen Untergrundes von ca. 15 cm gegenüber ca. 35 mm Dicke der Elastomer-Platte und den mechanischen Eigenschaften des bindigen Bodens, können sich Materialverquetschungen und Konsolidierungseffekte einstellen, die zu Umlagerungen in einem erheblichen Ausmaß führen können. Die kleinräumigen Deformationen zeigen nach den Ergebnissen - wegen der möglichen Materialwanderungen - bei einem mineralischen Untergrund keine so scharfen Übergänge, wie sie sich bei der künstlichen Unterlage einstellen.

Ein Abklingen der zu erwartenden zeitlich bedingten Zuwächse der Verformungen läßt sich aus keinem der beiden Versuche sicher ableiten. Besonders Beispiel 2 (Elastomer) zeigt noch einen deutlichen Zuwachs der Dehnungen zwischen dem 100-Std.-Versuch und dem 1.000-Std.-Versuch. In Beispiel 1 (Schluff) sind dagegen keine gravierenden Unterschiede mehr zwischen den Ergebnissen des 100-Std.-Versuchs und des 1.000-Std.-Versuchs erkennbar. Beobachtungen aus anderen Versuchen haben allerdings gezeigt, daß aufgrund versuchsbedingter Streuungen die Ergebnisse eines 1.000 Std.-Versuches - anders als bei den gezeigten Beispielen - durchaus auch unter denen eines 100 Std.-Versuches liegen können. Eine Beurteilung der zeitlichen Abhängigkeit ist daher wegen der versuchsspezifischen Unsicherheiten anhand von lediglich drei Einzelversuchen nur sehr bedingt möglich.

Während der Versuchsdurchführung läßt sich beobachten, daß sich bei Einsatz eines mineralischen Untergrundes nach etwa 200 - 300 Stunden keine weiteren über die Manometer der hydraulischen Belastungseinrichtungen registrierbaren und korrigierbaren Änderungen des aufgebrachtten Druckes mehr einstellen. Dies läßt sich als ein Indiz dafür werten, daß ab diesem Zeitpunkt nennenswerte - mit den zur Verfügung stehenden Mitteln auswertbare - Umlagerungen innerhalb des Aufbaus nicht mehr

stattfinden. Bei einer Elastomer-Platte als Untergrund ist dieser Zustand in der Regel ebenfalls nach etwa 200 Stunden erreicht.

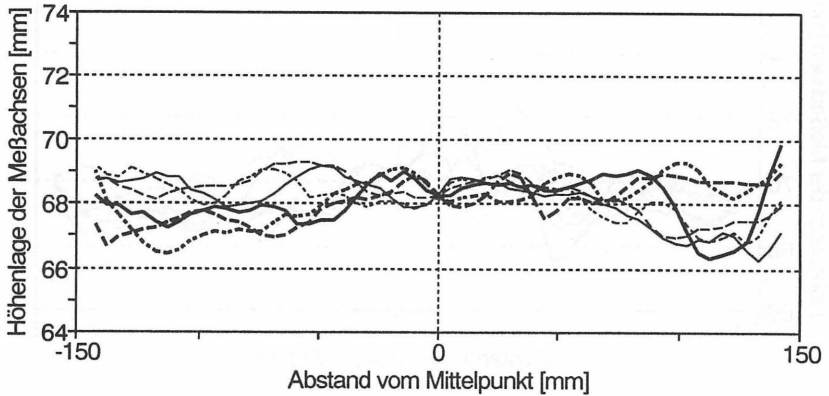


Bild 86.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 2
(Untergrund: Elastomer; Belastungsdauer: 10 Stunden)

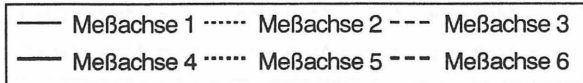
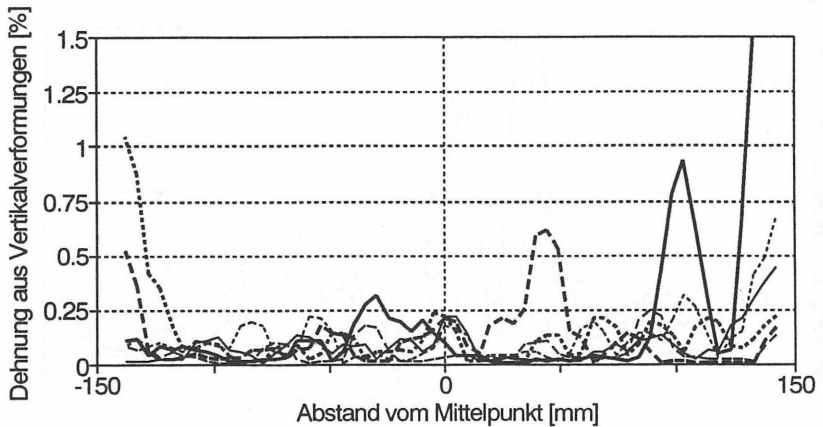


Bild 86.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 2
(Untergrund: Elastomer; Belastungsdauer: 10 Stunden)

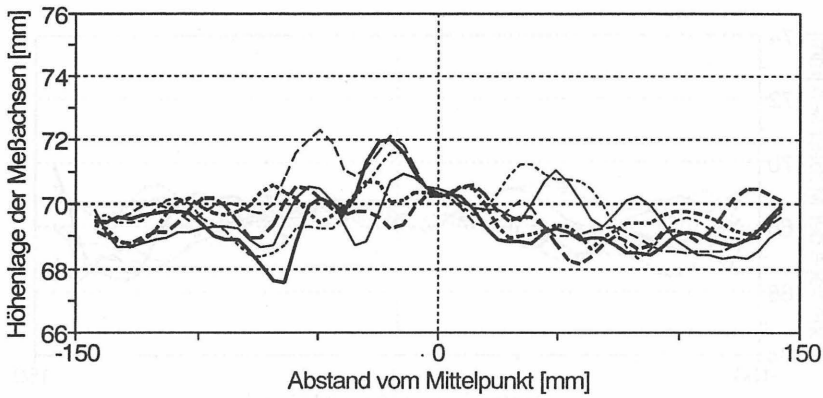
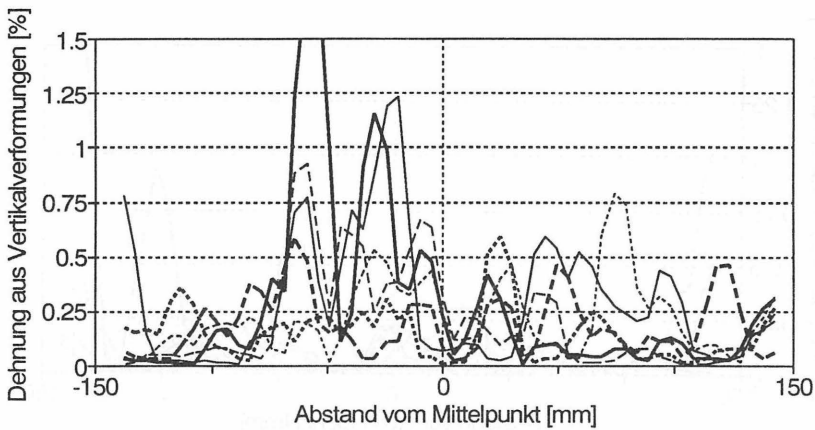


Bild 87.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 2
(Untergrund: Elastomer; Belastungsdauer: 100 Stunden)



— Meßachse 1	 Meßachse 2	--- Meßachse 3
— Meßachse 4	 Meßachse 5	--- Meßachse 6

Bild 87.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 2
(Untergrund: Elastomer; Belastungsdauer: 100 Stunden)

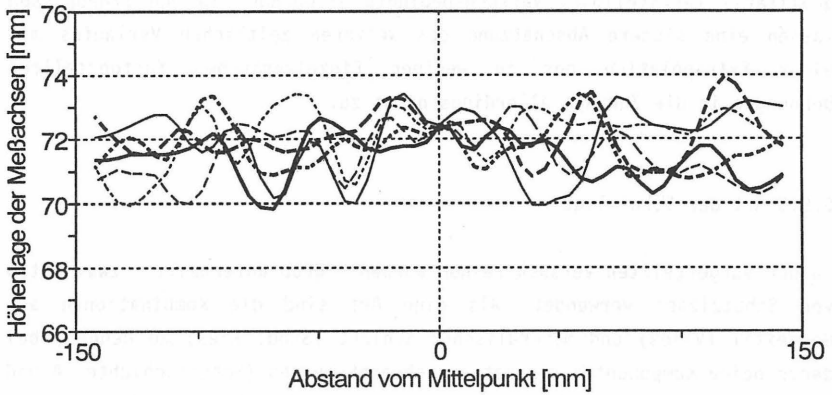


Bild 88.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 2
(Untergrund: Elastomer; Belastungsdauer: 1.000 Stunden)

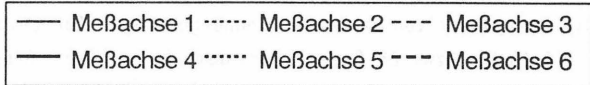
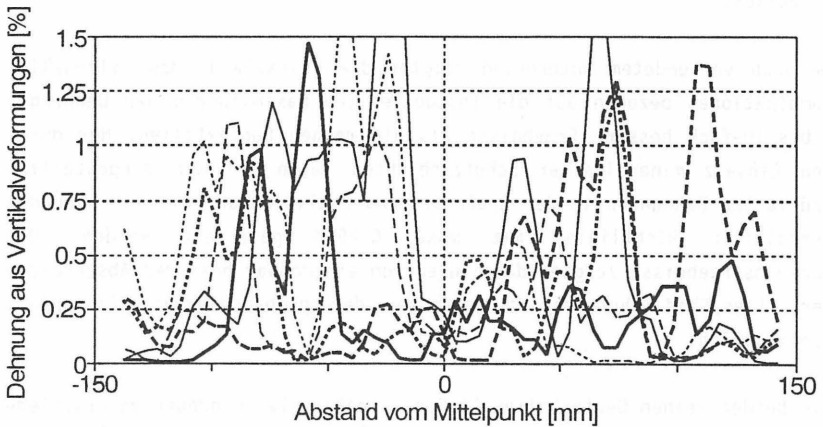


Bild 88.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 2
(Untergrund: Elastomer; Belastungsdauer: 1.000 Stunden)

Das zeitabhängige Verhalten der im Zeitstandlastplattendruckversuch zu testenden Komponenten ist unabhängig von der Art des Untergrundes

qualitativ feststellbar. Versuchsbedingte Streuungen in den Ergebnissen lassen eine sichere Abschätzung des weiteren zeitlichen Verlaufes mit einer Extrapolation der in wenigen Einzelversuchen festgestellten Dehnungen in die Zukunft allerdings nicht zu.

5.9.3 Art der Schutzlage

In den vorgestellten Versuchsreihen wurden – grob unterteilt – zwei Arten von Schutzlagen verwendet. Als eine Art sind die Kombinationen aus Geotextil (Vlies) und mineralischer Schicht (Sand, Kies) zu nennen, bei denen beide Komponenten separat ausgebracht werden (Schutzschichten A und B). Die zweite Art stellen die reinen Geotextilien dar, aus deren Gruppe zwei Verbundstoffe für die Untersuchungen ausgewählt wurden (Schutzlage C und D). Die beiden Arten unterscheiden sich in ihrer Schutzwirksamkeit erheblich.

Je nach verwendetem Untergrund zeigten die Vlies/Sand, bzw. Vlies/Kies Kombinationen bezogen auf die festgestellten Maximalwerte der Dehnungen 5 bis 10-fach bessere Ergebnisse als die reinen Geotextilien. Nur durch den Einsatz mineralischer Schutzschichten waren bei den eingestellten Prüflasten Dehnungen in der Größenordnung realisierbar, wie sie nach den derzeitigen Richtlinien mit $\max \epsilon = 0,25 \%$ gefordert werden. Die Versuchsergebnisse zeigten dabei wiederum ein meßbar besseres Abschneiden der Vlies/Sand-Schutzschicht gegenüber der grobkörnigeren Vlies/Kies-Schutzschicht.

Die beiden reinen Geotextilien ließen – trotz relativ großer Unterschiede in den Flächengewichten von 2.000 g/m^2 gegenüber 3.000 g/m^2 – nur vergleichsweise geringfügige Unterschiede in ihrer Schutzwirkung erkennen. Die festgestellten maximalen Dehnungen lagen für beide Produkte um das ca. 16-fache bzw. 25-fache über dem derzeitigen Grenzwert und zeigen somit deutlich die Grenzen der zur Zeit auf dem Markt befindlichen Geotextilien auf.

Als ein Vertreter einer dritte Gruppe von Schutzschichten, die als neue Entwicklungen angeboten werden, ist die ebenfalls in der vorgestellten Versuchsreihe untersuchte sogenannte Bentonitmatte einzustufen. Bei

diesem Typ handelt es sich um aus zwei Komponenten bestehende Schutzschichten, bei denen mineralische Materialien in Geotextilien eingearbeitet sind. Mit diesen Konstruktionen lassen sich die Vorteile der Geotextilien (leichtes, schnelles Verlegen) mit den Vorteilen der mineralischen Materialien (gute Schutzwirkung) kombinieren.

Wie den Ergebnissen entnommen werden kann, bietet die getestete Bentonitmatte (Schutzlage E) - bei der gewählten Anordnung der Matte, bezogen auf die maximalen Dehnungen - einen etwa um den Faktor 1,5 schlechteren Schutz als der 3.000 g/m^2 Verbundstoff. Schutzschichten, bei denen Sand in einer Dicke von ca. 2 - 3 cm, oder ein Bentonit/Sand-Gemisch in einer Dicke von ca. 5 - 7 cm zwischen zwei lediglich als Deckschichten fungierenden Geweben eingearbeitet ist, zeigen demgegenüber im Zeitstandlastplattendruckversuch erheblich günstigere Ergebnisse.

In den folgenden Abbildungen sind beispielhaft die Verformungen und die daraus errechneten Dehnungen einer Kunststoffdichtungsbahn wiedergegeben, welche zum einen durch eine Matte mit einer 2 - 3 cm dicken Sandfüllung (Beispiel 3, Bilder 89.1 und 89.2) und zum anderen durch eine Matte mit einer ca. 5 - 7 cm dicken Bentonit/Sand Füllung (Beispiel 4, Bilder 90.1 und 90.2) geschützt war. In beiden Fällen wurden die Schutzschichten mit einem Kies 16/32 beansprucht. Die Versuche wurden mit Prüflasten gefahren, die einer Spannung von 750 kN/m^2 (Beispiel 3), bzw. $1,2 \text{ MN/m}^2$ (Beispiel 4) entsprachen.

Die Sandmatten, bzw. Bentonit/Sandmatten sind in bezug auf ihre Schutzwirksamkeit zwischen den aus separaten Geotextilien in Kombination mit mineralischen Schichten bestehenden Schutzlagen und reinen geotextilen Schutzlagen einzuordnen. Je nach Ausführung können nach den ersten Erfahrungen mit diesen Produkten Effekte erzielt werden, die nahe an die Schutzwirkung der derzeit als optimal anzusehenden 10 - 15 cm dicken Sandschicht heranreichen.

5.9.4 Art des Untergrundes

Um definierte und leicht reproduzierbare Verhältnisse bei der Durchführung des Zeitstandlastplattendruckversuches zu gewährleisten, ist

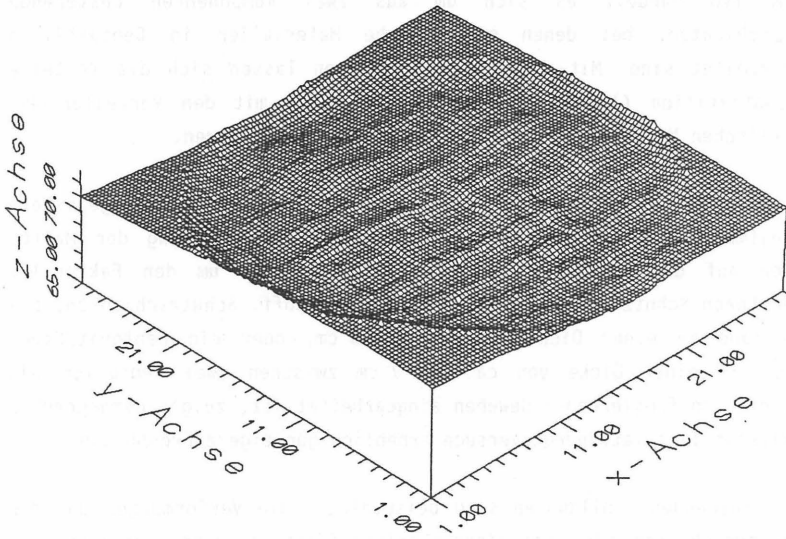


Bild 89.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 3
Sandmatte (10-fache Überhöhung)

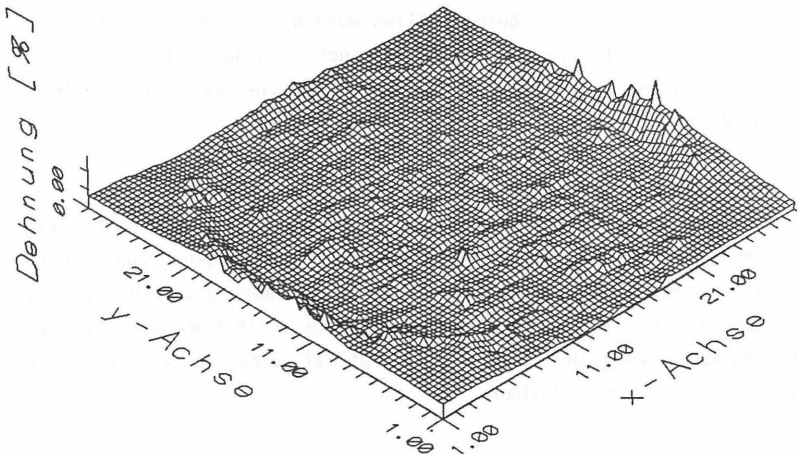


Bild 89.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 3, Sandmatte

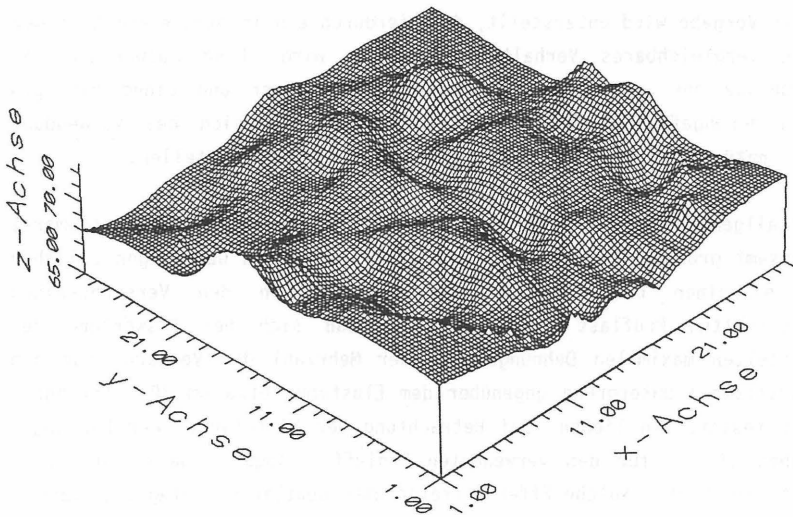


Bild 90.1: Verformung der Dichtungsbahn, Beispiel 4
Bentonit/Sandmatte (10-fache Überhöhung)

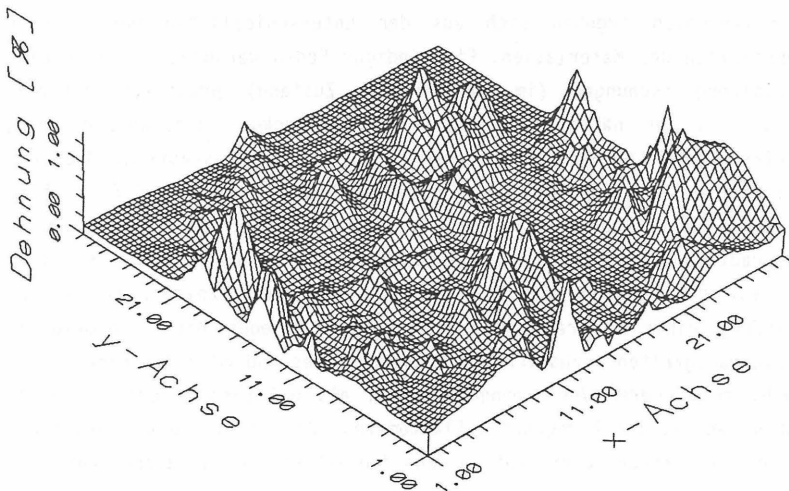


Bild 90.2: Dehnung der Dichtungsbahn, Beispiel 4, Bentonit/Sandmatte

lt. BAM eine 2 cm dicke Elastomerplatte als Untergrund zu verwenden. Bei dieser Vorgabe wird unterstellt, daß hierdurch ein in etwa einem bindigen Boden vergleichbares Verhalten geschaffen wird. Eine Auswertung der Ergebnisse der vorgestellten, mit einem Elastomer und einem bindigen Boden durchgeführten Parallelversuche zeigt, daß sich bei Verwendung eines natürlichen Bodens meßbar andere Verformungen einstellen.

Ganz allgemein stellen sich offensichtlich bei Einsatz eines Elastomeres insgesamt größere Dehnungen mit auffällig schärferen Übergängen zwischen den einzelnen Deformationen ein. Bei der in den Versuchsreihen eingestellten Prüflast (1 MN/m^2) galt, daß sich bei Auswertung der ermittelten maximalen Dehnungen bei der Mehrzahl der Versuche für den mineralischen Untergrund gegenüber dem Elastomer etwa um 30 % geringere Werte feststellen ließen. Bei Betrachtung der Mittelwerte der Dehnungen ergaben sich - für den verwendeten Schluff - sogar etwa um 40 - 50 % günstigere Werte. Solche Effekte treten umso deutlicher zutage, je größer die Verformungen sind, welche aufgrund der Belastung, Körnung oder den begrenzten Möglichkeiten der Schutzlage auftreten.

Die Differenzen ergeben sich aus den unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Materialien. Ein bindiger Boden versucht, sich infolge Materialverquetschungen (im undrnierten Zustand) praktisch volumenkonstant in der nächsten Umgebung der Eindrückung aufzuwölben. Dies aktiviert die Dichtungsbahn und vergleichmäßigt den Lastabtrag. Die Zugfestigkeit des ebenfalls volumenkonstanten Elastomeres ($\mu = 0,5$) verhindert eine derartige Aktivierung der Dichtungsbahn, da sich keine so ausgeprägte unmittelbare Materialaufwölbung um die Eindrückung einstellen kann. Wie die Versuche mit den Schutzlagen A und B zeigen, können bei Verwendung eines mineralischen Untergrundes dagegen nicht vermeidbare Ungleichmäßigkeiten bezüglich des Wassergehaltes und/oder der Einbaudichte u.U. zu größeren Verformungen führen, als bei Einsatz des in seiner Struktur wesentlich homogenen Elastomeres. Die Einflüsse des ungleichmäßigen Untergrundes überstrahlen dann die Effekte der Schutzschichten.

Bei höheren Beanspruchungen ergeben sich darüber hinaus bereits schon Unterschiede aus geometrischen Zwängen. In einer lediglich 2 cm dicken Elastomerplatte läßt sich zwangsläufig nur ein Profil mit einer Relieftiefe von maximal 2 cm einprägen. Bei wachsenden Auflasten

verringert sich die für individuelle Korneindrückungen zur Verfügung stehende Materialdicke immer mehr, so daß besonders bei hohen Prüfdrücken Verfälschungen des angestrebten Ergebnisses eintreten müssen. In solchen Fällen ist zumindest eine größere Dicke der Elastomerunterlage zu empfehlen.

Insgesamt läßt sich anhand der Ergebnisse belegen, daß die Wahl eines Elastomeres als Unterlage eine Entfernung von der tatsächlichen Situation darstellt, die den Zeitstandlastplattendruckversuch in gewisser Hinsicht bereits zu einem Indexversuch macht.

5.9.5 Prüftemperatur

Die Temperaturabhängigkeit der Kriech- und Relaxationsvorgänge macht die Temperatur zu einer wichtigen Größe bei der Prüfung des mechanischen Verhaltens von thermoplastischen Kunststoffen, zu denen auch PE und PP zählen. Für den Zeitstandlastplattendruckversuch ist daher nach der BAM-Richtlinie eine Prüftemperatur von 40°C verlangt. Diese Vorgabe orientiert sich an dem, was durch Beobachtungen an der Basis von Deponien festgestellt wurde. Messungen der Sickerwassertemperatur oder in Deponieentwässerungssystemen ergaben nach [28] Temperaturen von ca. 12,5°C bis zu etwa 40°C.

Die in dieser Arbeit behandelten Versuchsreihen wurden - wegen einer anderen Fragestellung - ausnahmslos bei einer Raumtemperatur von ca. 22°C gefahren, so daß ein Einfluß der Temperatur auf die Ergebnisse nicht abgeleitet werden kann.

Zur Abschätzung des langfristigen Verhaltens der Geotextilien und der Kunststoffdichtungsbahn kann eine Erhöhung der Versuchstemperatur auch über das für den tatsächlichen Einsatz zu erwartende Temperaturniveau hinaus zur Zeitraffung genutzt werden. Diese bei der Untersuchung des Materialverhaltens übliche Methode kann durch Extrapolation nach verschiedenen Verfahren ausgewertet werden [29], [30]. Besonders die Auswirkungen der Kriechneigung der Materialien (permanente Auflast) lassen sich auf diese Weise innerhalb überschaubarer Versuchszeiten untersuchen.

5.10 Wölbversuche

5.10.1 Allgemeines

Die für den Nachweis der Schutzwirksamkeit im Zeitstandlastplattendruckversuch definierten Grenzwerte wurden gewählt, um eine Beschädigung der Dichtungsbahn durch punktförmige Belastungen auszuschließen. Die Möglichkeiten der Kunststoffdichtungsbahn, Dehnungen in gewissen Größenordnungen ohne Einbußen der Funktionsfähigkeit zu ertragen, sollen durch diese engen Vorgaben in vollem Umfang für Beanspruchungen infolge anderer Ursachen reserviert bleiben. In den im folgenden beschriebenen Versuchen sollte festgestellt werden, ob die im Zeitstandlastplattendruckversuch hervorgerufenen kleinräumigen Deformationen einen meßbaren Einfluß auf das mechanische Verhalten – als Indikator für den Zustand – der Dichtungsbahn haben.

Die aufgrund von Setzungen in die Dichtungsbahn eingetragenen Verformungen führen zu mehraxialen Zugbeanspruchungen in dem Flächenelement. Das Verhalten bei einer solchen Belastung wird üblicherweise in einem sogenannten Wölbversuch (oder auch Berstversuch), in Anlehnung an DIN 53 861 [31], ermittelt. Bei diesem Versuch werden Proben über einen Klemmring kreisförmig eingespannt. Die Abmessungen der Vorrichtung sind so gewählt, daß sich die Probe über eine Fläche von 800 mm (je nach Apparatur bis zu bis 1000 mm) Durchmesser bei einer Beanspruchung durch Wasserdruck frei aufwölben kann. Eine Schemazeichnung der Versuchsapparatur ist als Bild 91 wiedergegeben. Der Druck wird stufenweise um jeweils 20 kPa gesteigert und auf jeder Stufe für 2 Minuten gehalten. Der Versuch wird bis zum Versagen, einem deutlichen lokalen Verstrecken der Dichtungsbahn gefahren. Aus der sich zu diesem Zeitpunkt abmessbaren Wölbhöhe h_w und dem Radius der freien Einspannfläche r_w wird die Wölbbogendehnung ϵ_{wb} nach der folgenden Beziehung bestimmt.

$$\epsilon_{wb} = \arcsin \alpha / \sin \alpha - 1 \quad (11)$$

mit $\arcsin \alpha = (2\pi / 360) \cdot \alpha$

und $\sin \alpha = 2r_w h_w / (r_w^2 + h_w^2)$

wobei r_w = Radius der ideal kreisförmigen Aufwölbung [mm]

h_w = Wölbhöhe (Stich) [mm]

α = Winkel des durch die Aufwölbung beschriebenen

Kreisabschnittes

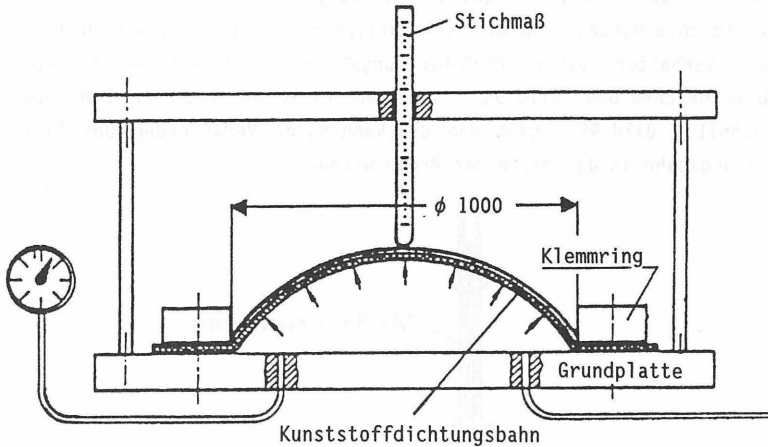


Bild 91: Schemazeichnung der Wölbversuchsanordnung, aus [2]
Ingenieurbüro Schicketanz, AMPA Hannover

Die Dehnungen, die sich bei einem Wölbversuch einstellen, haben keinen – wie bei einer Berechnung nach Gleichung (11) unterstellt – über den gesamten betrachteten Schnitt gleichmäßigen Verlauf, sondern zeigen ein Maximum in der Mitte der Probe. In dem Forschungsbericht 27/91 der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., STUVA [32], sind Ergebnisse aus derartigen Berechnungen entsprechenden Messwerten gegenübergestellt. Die für die Versuche verwendete Prüfeinrichtung ist in Bild 92 wiedergegeben.

Bild 93 zeigt die bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,1 bar/min registrierten Aufwölbungen verschiedener Dichtungsbahnen. Die bei unterschiedlichen Wölbhöhen gemessenen Dehnungen in der Mitte der Probe sind in der Tabelle 29 aufgelistet. Der Bereich innerhalb dessen die Dehnungen aufgenommen wurden, kann der Darstellung in Bild 94 ersehen werden.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, daß die in der Mitte auftretenden maximalen Dehnungen je nach Wölbhöhe bis zu über 100 % über den Werten liegen können, die sich bei der Ermittlung einer mittleren Dehnung unter der Annahme eines Kreisabschnittes errechnen. Welche Auswirkungen diese

über die Fläche ungleichmäßigen Dehnungen auf die Dicke der Kunststoffdichtungsbahnen haben, verdeutlichen KREITER und HUTTEN [33], die das Verhalten einer PEHD-Dichtungsbahn in einem Berstversuch $\phi 1.000$ mm beschreiben. Bild 95.1 zeigt die Dicke der Dichtungsbahn über einen Schnitt, Bild 95.2 gibt die druckabhängige Veränderung der Dicke der Dichtungsbahn in der Mitte der Probe wieder.

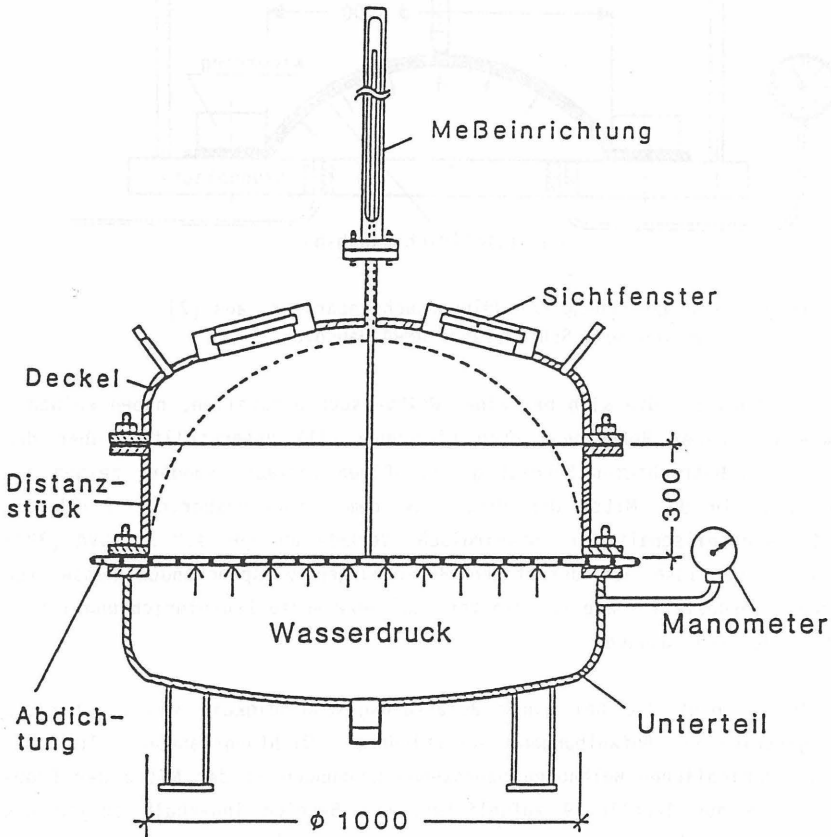


Bild 92: Prüfeinrichtung für Berstdruckversuche, aus [32]

Schädigende lokale Materialschwächungen von Kunststoffdichtungsbahnen infolge punktueller Beanspruchungen müßten in einem Berstversuch zu einem frühzeitigen Versagen oder zu einem meßbar anderen Dehnungsverhalten führen. Zur Untersuchung, ob, bzw. in welchem Maße die

Dichtungsbahnproben im Zeitstandlastplattendruckversuch eine Schädigung erfahren haben, wurde daher das mechanische Verhalten der Prüflinge in einem modifizierten Berstversuch - bzw. in diesem Fall zutreffender: Wölboversuch - getestet. Mit diesem Verfahren sollten erste, einfach zu ermittelnde Hinweise auf eventuelle nachteilige Veränderungen der Dichtungsbahnproben erarbeitet werden.

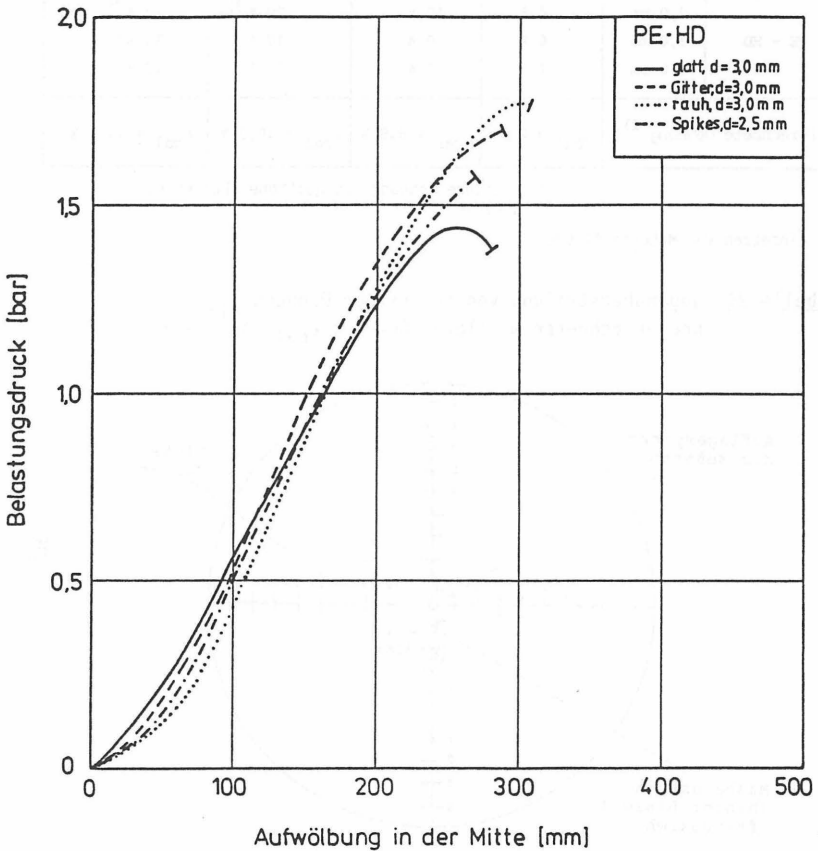


Bild 93: Aufwölbung der Dichtungsbahnen, aus [32]
(Belastungsgeschwindigkeit ca. 0,1 bar/min)

Material	Dicke	Gemessene Dehnungen ϵ_{1-2} bei Wölbböhen von			
		ca. 100 mm	ca. 150 mm	ca. 200 mm	ca. 250 mm
CHD	2,0 mm	3 ‰	6 ‰	11 ‰	22 ‰
	3,0 mm	4 ‰	6 ‰	12 ‰	18 ‰
	4,0 mm	4 ‰	8 ‰	16 ‰	27 ‰ ³⁾
PE - HD	2,0 mm	4 ‰	10 ‰	20 ‰ ³⁾	22 ‰ ³⁾
	3,0 mm	6 ‰	10 ‰	18 ‰	24 ‰ ³⁾
	4,0 mm	4 ‰	8 ‰	14 ‰	22 ‰
Errechnete Dehnung ²⁾		$\epsilon_{cal} = 2,6 ‰$	$\epsilon_{cal} = 5,9 ‰$	$\epsilon_{cal} = 10,3 ‰$	$\epsilon_{cal} = 15,9 ‰$

2) mittlere Dehnung aus Wölbböhe über Kugelannahme

3) Einsetzen von Materialfließen

Tabelle 29: Gegenüberstellung von gemessener Dehnung ϵ_{1-2} und errechneter mittlerer Dehnung ϵ_{cal} , aus [32]

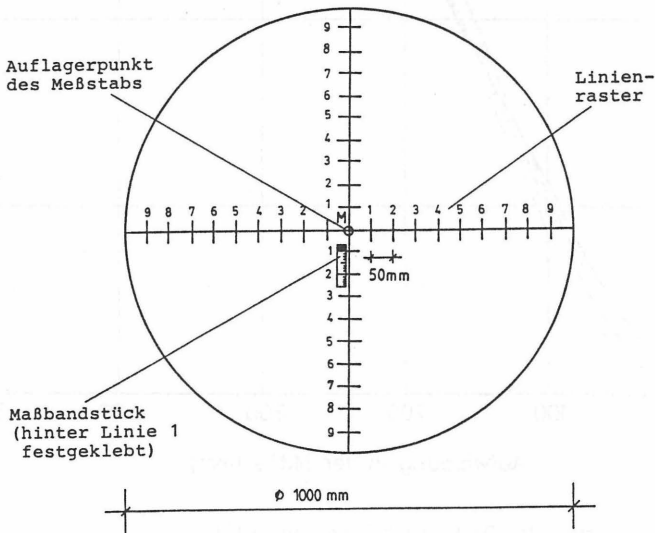


Bild 94: Raster auf dem Prüfling zur Messung der Dehnung, aus [32]
 ϵ_{1-2} zwischen den Skalenteilen 1 und 2 im Berstdruckversuch
 (Abstand zwischen den Markierungen im unbelasteten Zustand 50 mm)

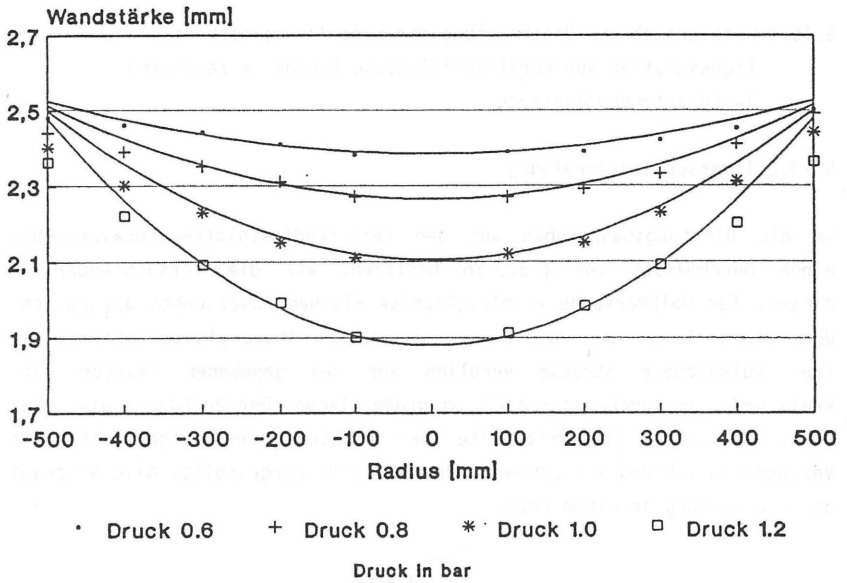


Bild 95.1: Dicke der Dichtungsbahn in einem Schnitt, aus [33]

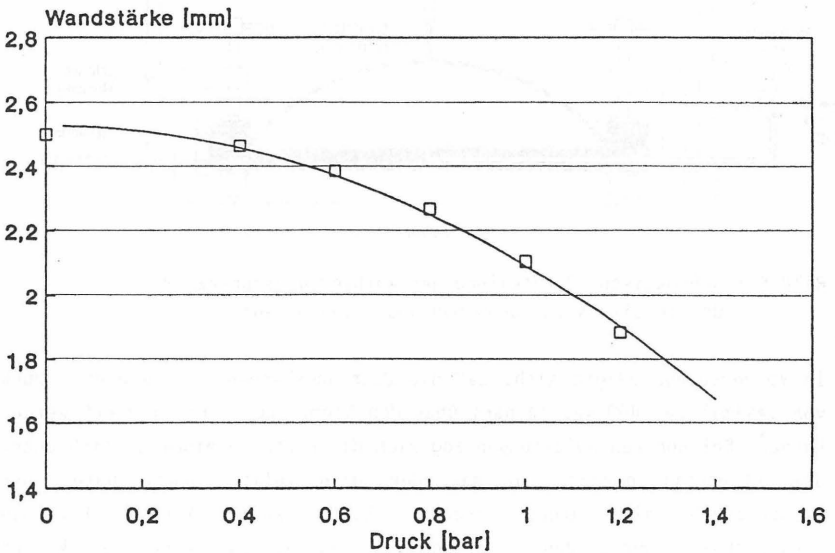


Bild 95.2: Dicke der Dichtungsbahn in Probenmitte
in Abhängigkeit des Drucks, aus [33]

5.10.2 Wölbversuch zur Untersuchung der Veränderung mechanischer Eigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen im Zeitstand-Lastplattendruckversuch

5.10.2.1 Versuchsbeschreibung

Da die Dichtungsbahnproben aus den Zeitstandlastplattendruckversuchen einen Durchmesser von ϕ 300 mm besitzen, war die Versuchsanordnung diesen, für Wölbversuche vergleichsweise kleinen Abmessungen anzupassen. Über einen Klemmring wurden die Proben auf der Trägerplatte fixiert. Als frei aufwölbbare Strecke verblieb aus den gegebenen Zwängen eine kreisrunde, im Durchmesser ϕ 250 mm große Fläche. Der Prüfdruck wird über Luftdruck gegen die Unterseite der Dichtungsbahn, aufgebracht. Die Versuchseinrichtung ist schematisch in Bild 96 dargestellt. Bild 97 zeigt die Einrichtung in einem Foto.

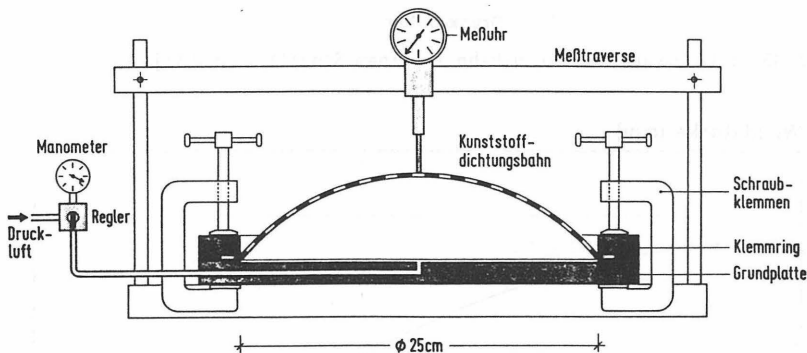


Bild 96: Schematische Darstellung der Wölbversuchsapparatur des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik

In Vorversuchen zeigte sich, daß die Dichtungsbahnen bis zu einem Druck von maximal ca. 400 kPa (4 bar) über den Klemmring sicher fixiert werden können. Bei höheren Belastungen zog sich die Probe in einem Bereich unter dem Klemmring hervor, so daß der eingestellte Druck unter der Dichtungsbahn nicht mehr aufrecht erhalten werden konnte. Für die Versuchsreihe wurde daher entschieden, durchgehend einen Druck von 350 kPa (3,5 bar) einzustellen.

Der gesamte Versuchsablauf sieht wie folgt aus:

- Einbau der Probe
- Einstellen des Prüfdruckes auf 350 kPa in der Vorratsleitung
- Öffnen des Absperrhahns ==> Beginn der Zeitmessung
- Registrierung der Wölbbhöhe in festen Zeitabständen bis 24 Std.

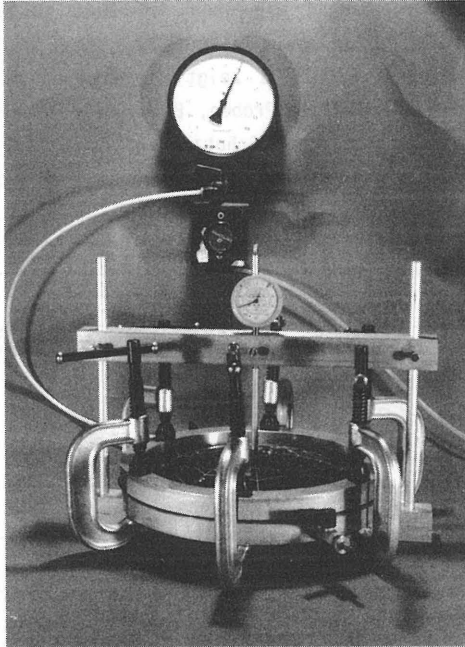


Bild 97: Foto der Wölbbversuchsapparatur

Die Wölbbhöhe wurde über eine Meßuhr kontrolliert und jeweils nach

10, 20, 30	Sekunden
1, 2, 5, 10, 20, 30, 45	Minuten
1, 2, 3, 4, 8, 24	Stunden abgelesen.

Für die Wölbbversuche wurden aus den zur Verfügung stehenden Proben der Versuchsserien die Dichtungsbahnen ausgewählt, die durch rein geotextile Schutzlagen geschützt waren und auf einer Elastomer-Unterlage platziert waren. Durch diese Wahl wurden die Proben untersucht, die zum einen eine relativ starke Belastung erfahren hatten, zum anderen wegen der

einheitlichen Unterlage eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten.

5.10.2.2 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse

In den folgenden Darstellungen sind die über die Zeit aufgenommenen Wölbböhen h_w (Stich) der einzelnen Teilversuche - in Gruppen zusammengefaßt - wiedergegeben. Bild 98.1 zeigt die Ergebnisse der aus den Reproduktionsversuchen ausgewählten Proben, Bild 98.2 die der Proben aus den Versuchen mit unterschiedlichen Schutzlagen. In Bild 98.3 sind die Wölbböhen der mit Kugeln $\phi 32$ mm und die der ohne jede Schutzlage beanspruchten Dichtungsbahnen dargestellt.

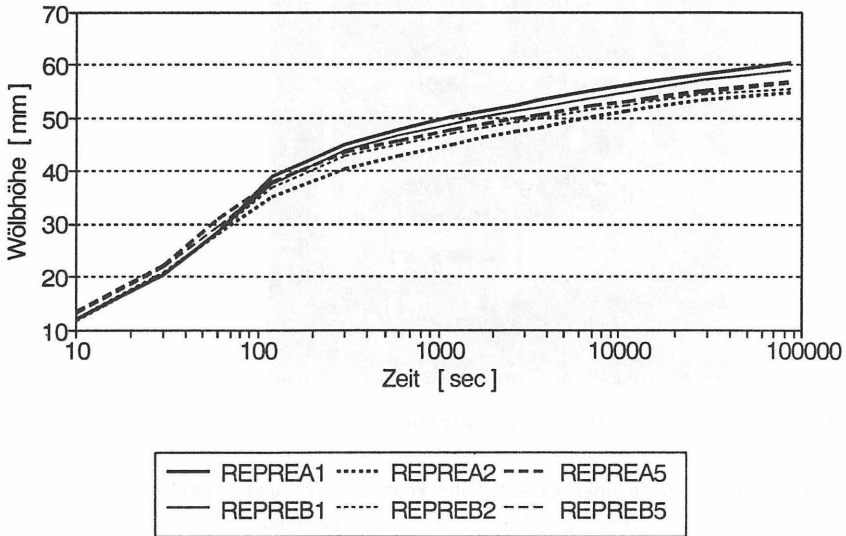


Bild 98.1: Wölbböhe in Abhängigkeit der Zeit
(Proben aus Reproduktionsversuchen)

Aus den Graphiken ist kein besonders hervorstechendes Verhalten einzelner Proben zu erkennen. Der anfänglich (bis ca. 100 Sekunden) konkave Verlauf der Kurven ist daraus zu erklären, daß - zur Vermeidung von Schlägen im Druckluftsystem bei einer plötzlich eintretenden Undichtigkeit

(z.B. Bersten der Probe) - eine Düse am Auslaß zur Trägerplatte zwischengeschaltet ist, die nur eine begrenzte Luftmenge pro Zeiteinheit unter die Dichtungsbahn strömen läßt. Erst ab etwa 100 Sekunden (Wölhhöhe $h_w \approx 40$ mm) dominiert das Dehnungsverhalten der Kunststoffdichtungsbahn. Die nach 24 Stunden festgestellten Wölhhöhen zeigen nur geringe Unterschiede.

Die Wölhhöhe von ca. $h_w \approx 60$ mm, die annähernd bei allen Proben gemessen wurde, bedeutet eine mittlere Dehnung von ca. $\epsilon_{wb} = 16$ %. Ein Bersten oder der Beginn eines örtlichen Versagens wurde bei keinem der Versuche festgestellt.

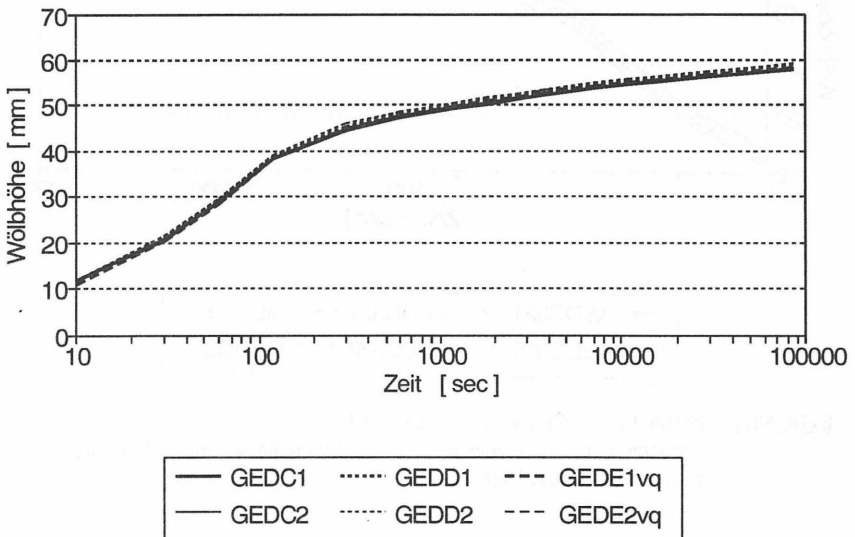


Bild 98.2: Wölhhöhe in Abhängigkeit der Zeit
(Proben aus Versuchen mit unterschiedlichen Schutzlagen)

Den Einfluß der Beanspruchung durch die Belastung in den Zeitstandlastplattendruckversuchen zeigen die Bilder 99.1 und 99.2. In diesen Darstellungen sind die in den Druckversuchen registrierten Dehnungen, bzw. die errechneten Krümmungsradien der einzelnen Dichtungsbahnproben über die ermittelten Wölhhöhen aufgetragen. Als Wölhhöhe wurde in diesem Zusammenhang die jeweilige Differenz aus dem

nach 24 Stunden gemessenen Wert und dem 10 Sekunden nach Beginn der Belastung abgelesenen Stich bezeichnet. Zu diesem Zeitpunkt waren die Dichtungsbahnen bereits leicht aufgewölbt, so daß nur das Verhalten unter Druckbelastung erfaßt wurde. Ungenauigkeiten bei der Messung des ersten Wertes im unbelasteten Zustand durch Absetzen der Meßuhr in dauerhaft eingeprägte Oberflächenunebenheiten wurden so weitgehend eliminiert.

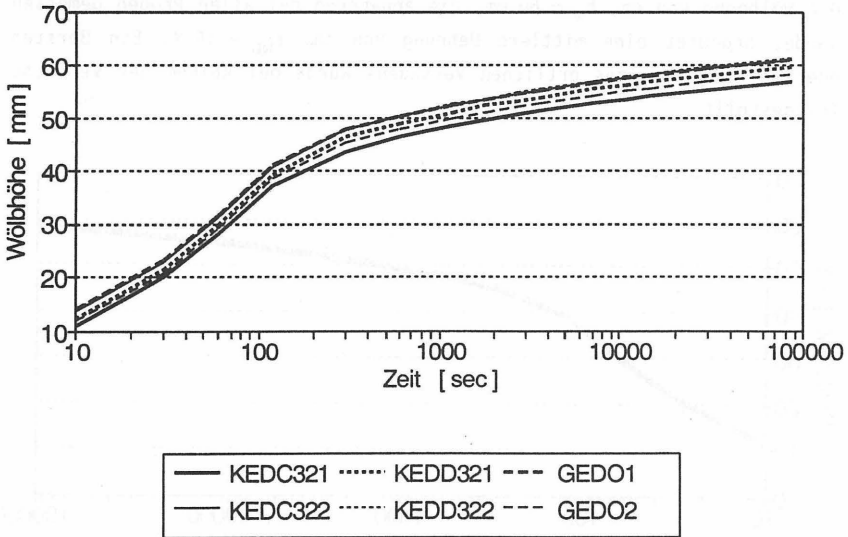


Bild 98.3: Wölbhöhe in Abhängigkeit der Zeit
(Proben aus Versuchen mit künstlichen Belastungsbildern,
bzw. ohne Schutzlage)

In Bild 99.1 sind die für die einzelnen Belastungsversuche ermittelten maximalen Dehnungen (linke y-Achse) und die Mittelwerte der Dehnungen (rechte y-Achse) über den das Verhalten der selben Probe im Wölbversuch beschreibenden Wert (Stich) aufgetragen. Bild 99.2 zeigt die gleichen Abhängigkeiten für den jeweils errechneten minimalen Krümmungsradius (linke y-Achse) und den für jede Probe ermittelten Mittelwert aller erfaßter Radien (rechte y-Achse).

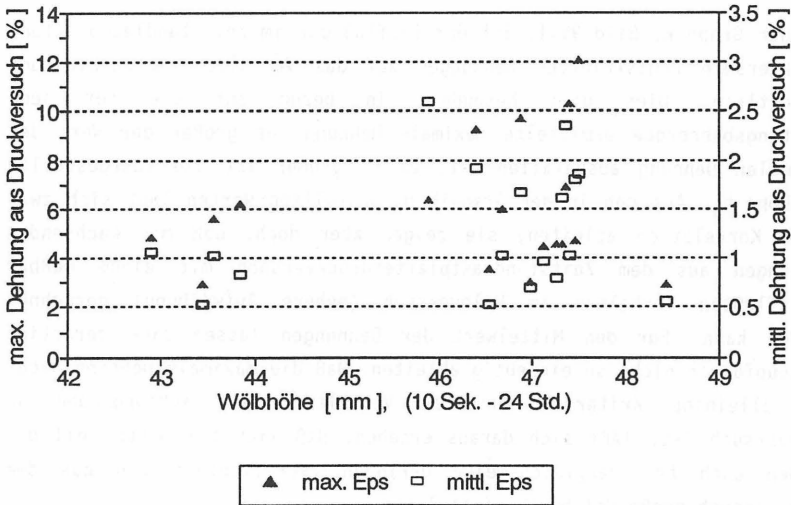


Bild 99.1: Einfluß der Dehnungen im Zeitstandlastplattendruckversuch auf das Verhalten im Wölbversuch

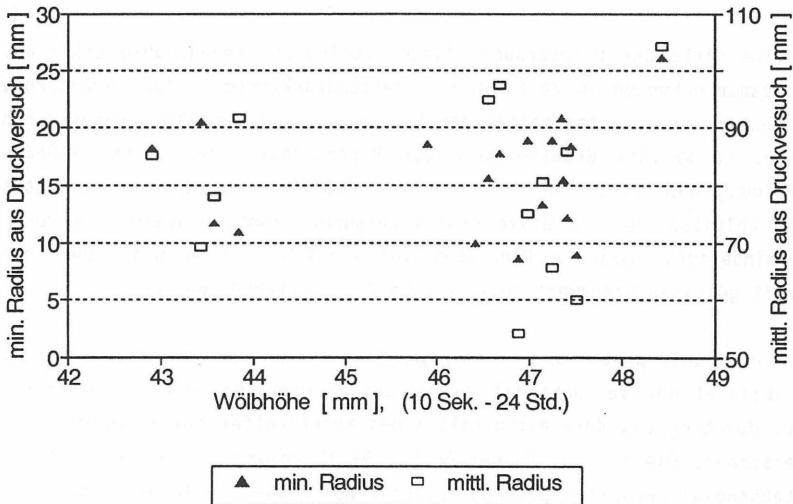


Bild 99.2: Einfluß der Krümmungen im Zeitstandlastplattendruckversuch auf das Verhalten im Wölbversuch

Aus der Graphik, Bild 99.1, ist der Einfluß der im Zeitstandlastplatten-druckversuch registrierten Dehnungen auf das Verhalten im Wölbversuch ersichtlich. Dies gilt besonders in bezug auf die für jede Dichtungsbahnprobe ermittelte maximale Dehnung. Je größer der Wert der maximalen Dehnung ausgefallen ist, um so größer ist die festgestellte Wölbhöhe h_w . Aus den in der Graphik dargestellten Werten läßt sich zwar keine Korrelation ableiten, sie zeigen aber doch, daß mit wachsenden Dehnungen aus dem Zeitstandlastplattendruckversuch mit einem meßbar beeinflussten Verhalten im Wölbversuch (höhere Aufwölbung) gerechnet werden kann. Für den Mittelwert der Dehnungen lassen sich derartige Verknüpfungen nicht so eindeutig ableiten. Daß die maximale Dehnung nicht das alleinige Kriterium für das Verhalten der Dichtungsbahn im Wölbversuch ist, läßt sich daraus ersehen, daß sich bei einem Teil der Proben auch bei vergleichsweise geringen (Vor-)Verformungen aus dem Druckversuch große Wölbhöhen einstellten.

Aus den in Bild 99.2 dargestellten Verknüpfungen der errechneten Krümmungsradien, als ein anderes Maß der Vorbelastung der Dichtungsbahn, und der Wölbhöhen ist kein deutbarer Zusammenhang erkennbar.

Die Ergebnisse der Wölbversuche lassen zumindest tendenzmäßig erkennen, daß Beanspruchungen im Zeitstandlastplattendruckversuch eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Kunststoffdichtungsbahnen verursachen können. Ab welcher Größenordnung der Verformungen eine solche meßbare Schädigung einsetzt, läßt sich aus den vorliegenden Ergebnissen noch nicht ableiten, da für diese ersten Versuche Proben ausgesucht wurden, die mindestens maximale Dehnungen von $\epsilon > 2\%$ - also weit über dem derzeit gültigen Grenzwert ($\max \epsilon = 0,25\%$) - erfahren hatten.

Bei der Interpretation der Ergebnisse und der Beurteilung der Sensibilität der Versuche ist zu berücksichtigen, daß die beschriebenen Tests durchweg das Kurzzeitverhalten des Kunststoffes bei Raumtemperatur untersuchen. Die Kurven (Bilder 98.1 - 98.3) zeigen jedoch deutlich das zeitabhängige Verhalten des Kunststoffes, bei dessen weiterer Beobachtung eine eventuelle Schädigung der Proben möglicherweise deutlicher zutage tritt. Unter der gleichbleibenden Beanspruchung durch den eingestellten Prüfdruck von 350 kPa (3,5 bar) stellt sich durch Kriechvorgänge eine

immer größere Wölbbhöhe ein. Exemplarisch ist dieses Verhalten über einen Zeitraum von 10^6 Sekunden (11,5 Tage) an der Probe KEDD322 in Bild 100 dargestellt.

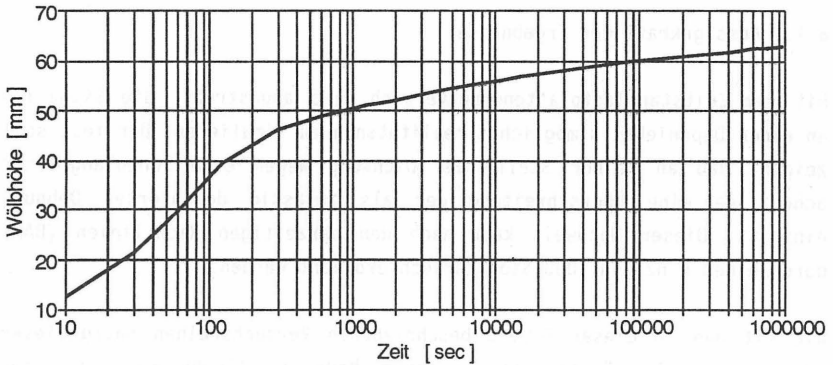


Bild 100: Wölbbhöhe in Abhängigkeit der Zeit, Probe KEDD322

Dieses bei einer Temperatur von 20°C beobachtete Verhalten wurde von DUVALL [34] in Berstversuchen bei verschiedenen Temperaturen (23°C, 60°C, 80°C) untersucht. Die temperaturbedingt erheblich verkürzten Zeiten bis zum Versagen der Proben sind in Bild 101 wiedergegeben. Die Kurven zeigen den bedeutenden Einfluß, den die Temperatur auf die Belastbarkeit der Dichtungsbahnen hat.

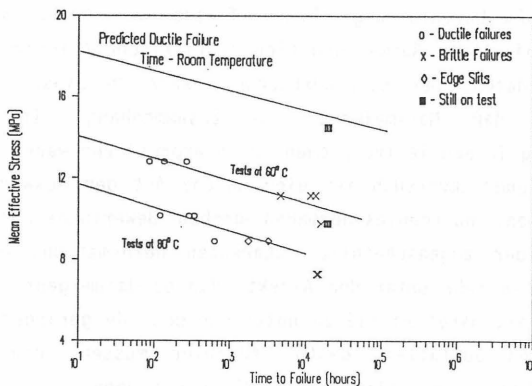


Bild 101: Standzeiten einer Dichtungsbahn in Abhängigkeit von Temperatur und Spannung, aus [34]

6. Folgerungen

6.1 Gesamtbeurteilung des Zeitstandlastplattendruckversuches

6.1.1 Aussagekraft der Ergebnisse

Mit dem Zeitstandlastplattendruckversuch wird angestrebt, die Situation an einer Deponiebasis möglichst realitätsnah zu simulieren. Der Test soll zeigen, daß an keiner Stelle der Dichtung wegen einer unzulänglichen Schutzlage eine Überschreitung der als zulässig definierten Dehnung eintritt. Dieser Nachweis kann nach den derzeitigen Richtlinien (BAM) durch einen einzigen 1000-Std.-Versuch erbracht werden.

Wie mit den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsreihen nachgewiesen wurde, sind die Ergebnisse in einem Maße zufallsabhängig, daß der Zeitstandlastplattendruckversuch in der empfohlenen Form als nicht geeignet angesehen werden muß, die Wirksamkeit einer Schutzlage mit der vorausgesetzten Genauigkeit reproduzierbar nachzuweisen. Bei der Beurteilung vorgesehenen Parameter, der maximal feststellbaren Dehnung, wurden, bezogen auf den mittleren Wert aus einer Reihe von Einzelversuchen, Streuungen vom Mittel $\pm 44\%$ (maximal $\pm 58\%$) festgestellt. Erst bei einer ausreichenden Anzahl von Teilversuchen läßt sich die Wirkung einer geprüften Schutzlage eingrenzen und bewerten.

Eine Prüfung, bei der die Durchführung mehrerer Teilversuche erforderlich würde, verlangt zur objektiven Auswertung eine statistische Aufbereitung der relevanten Einzeldaten. Der Eignungsnachweis wäre in diesem Fall dadurch zu führen, daß Maximalwerte im Zusammenhang mit der festgestellten Streuung in den Teilversuchen zu interpretieren wären. Für den Zeitstandlastplattendruckversuch ist eine solche Art der Auswertung mit den vorgeschlagenen, nachgewiesenermaßen groben Bewertungsmethoden (manuelles Vermessen der augenscheinlich stärksten Deformation) nicht möglich. Dies gilt um so mehr unter dem Aspekt, daß es darum geht, sehr kleine Deformationen festzustellen und zu unterscheiden. Je geringer die festzustellenden Größen ausfallen, desto sensibler müssen auch die Verfahren zur Feststellung dieser Werte sein. Wie die Ergebnisse gezeigt haben, ist selbst das mit einem relativ großen Aufwand arbeitende, in dieser Arbeit vorgestellte Abtast- und Auswertesystem mit einer

einzukalkulierenden Toleranz behaftet, die bei den ermittelten Dehnungen - bezogen auf den zulässigen Grenzwert von $\max \epsilon = 0,25\%$ - etwa bis zu 20 % ausmacht.

Trotz dieser Einschränkungen können mit dem Versuch qualitative Unterschiede zwischen einzelnen Schutzlagen nachgewiesen werden. Wegen der Unschärfe der Einzelergebnisse lassen sich jedoch keine Prognosen ableiten. Für jede Last/Kies/Schutzlagen-Kombination ist daher bei den derzeitigen Möglichkeiten ein spezieller experimenteller Nachweis erforderlich.

6.1.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus einem Versuch auf die tatsächliche Situation wird durch eine wirklichkeitsgetreue Simulation der Verhältnisse, oder durch die Anwendung abgesicherter und nachvollziehbarer Beziehungen hergestellt. Der Zeitstandlastplatten-druckversuch stellt eine weitgehende Nachbildung der tatsächlichen Verhältnisse an der Deponiebasis (in der Deponieabdeckung) dar. Als im Grunde einzige Vereinfachung im Versuchsaufbau wurde die Verwendung einer künstlichen Unterlage, statt des vor Ort eingebauten Bodens, vereinbart. Für den überschaubaren Versuchsablauf wurden die Arten und die Größe möglicher zu berücksichtigender Lastfälle allein auf die statische Belastung infolge der zu erwartenden Müllauflast beschränkt. Aus diesen Vereinfachungen ergeben sich Konsequenzen auf die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse.

Je nach Wahl des Untergrundes ergeben sich - bei sonst gleichen Bedingungen - nachweisbar systembedingt voneinander abweichende maximale Dehnungen. Die Elastomerunterlage stellt dabei in der Regel für mittlere Belastungen (Müllhöhen zwischen 15 m und 35 m) einen Untergrund dar, der ungünstigere Ergebnisse (größere Dehnungen der Kunststoffdichtungsbahn) liefert als ein natürlicher Boden. Die Ergebnisse beinhalten aus diesem Umstand somit eine - wenn auch nicht genau quantifizierbare - gewisse Sicherheit.

Mit der Berücksichtigung nur der rein statischen Belastung infolge Müllaufplast ist der Lastfall erfaßt, welcher durch keine Maßnahme beeinflußt werden kann. Beanspruchungen des Abdichtungssystems während der Bau- und Betriebsphase, welche u.U. örtlich zu größeren Belastungen der Schutzlage und der Dichtungsbahn führen könnten, lassen sich demgegenüber durch eine entsprechende Gerätewahl und/oder einen geeigneten Bauablauf vermeiden. Die Auswirkungen derartiger Lastfälle sind mit einem vertretbaren Aufwand im Labor nicht zu simulieren und müßten daher vor Ort, z.B. im Rahmen eines Probefeldes, untersucht werden.

Die Ergebnisse des Zeitstandlastplattendruckversuches sind, unter Berücksichtigung der erläuterten Einschränkungen, durchaus auf die Situation an der Deponiebasis oder in einer Deponieabdeckung übertragbar. Mit Hilfe dieses Versuches lassen sich, besser als mit jedem anderen zur Zeit bei der Geotextilprüfung angewendeten Test, die für das geplante System zu erwartenden Dehnungen abschätzen. Der genaue Wert läßt sich zwar wegen der unvermeidbaren Streuungen nicht ermitteln, die registrierbaren Verformungen zeigen aber zumindest die Größenordnung auf, innerhalb derer sich die tatsächlichen Beanspruchungen bewegen werden. Als Beanspruchung sind in diesem Fall alle Auswirkungen auf den Zustand der Kunststoffdichtungsbahn zu verstehen, die durch eine visuelle Begutachtung (z.B. Kerben, Perforationen) und meßtechnische Erfassung (z.B. Dehnungen, Dickenänderungen) feststellbar sind.

6.1.3 Auswertungskriterien

Zur Beurteilung der Wirkung einer zu testenden Schutzlage wird im Zeitstandlastplattendruckversuch als alleiniges Kriterium die nach dem Versuch feststellbare maximale Verformung der Dichtungsbahn herangezogen.

Die Festlegung des Grenzwertes von $\max \epsilon = 0,25 \%$ orientiert sich wegen nur ungenügender Kenntnisse anderer möglicher Belastungen nicht an den Möglichkeiten des eingesetzten Materials. Die Wahl dieses Wertes soll sicherstellen, daß die Beanspruchungen aus der ungleichförmigen Belastung durch die Kiesschicht möglichst gegen Null gehen. Ob gerade die Beschränkung der rechnerischen Dehnung das alleinige Maß für eine alle

Aspekte der mechanischen Belastung durch die Kieskörner erfassenden Schutzwirkung ist, erscheint fraglich.

Wegen des zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens der für die Schutzlage (falls Geotextil) und Dichtungsbahn verwendeten Thermoplaste, stellt das Ergebnis des Versuches selbst nach 1000 Stunden nur eine Momentaufnahme dar. Relaxations- und Kriechvorgänge werden die Situation im Laufe der Zeit weiter verändern. Die (Zug-)Spannungen infolge der durch die Belastung aufgezwungenen und nach dem Versuch registrierten und bewerteten Dehnungen verlieren sich innerhalb eines gewissen Zeitraumes. Bestehen bleiben jedoch die (Druck-)Spannungen unter den einzelnen Kieskörnern, die infolge der permanent wirkenden Auflast durch Kriecherscheinungen auf lange Sicht die Wirkung einer rein geotextilen Schutzlage immer weiter abschwächen können. Aussagen darüber, über welche Zeiträume die verwendeten Materialien einer solchen Dauerbelastung standhalten, sind nicht bekannt.

Für eine sichere Beurteilung der Funktionssicherheit der Schutzschicht über einen Zeitraum, der mindestens die zu erwartende Lebensdauer des zu schützenden Elementes, der Kunststoffdichtungsbahn, abdecken sollte, reicht die alleinige Betrachtung der in dem Versuch hervorgerufenen Dehnungen daher nicht aus. Ohne die Berücksichtigung des tatsächlichen Langzeitverhaltens unter den mechanischen und chemischen Beanspruchungen ist die Bewertung allenfalls als Abschätzung eines Qualitätsmerkmals zu betrachten, das nach dem derzeitigen Kenntnisstand jedoch eine rein mechanische Überbeanspruchung ausschließt.

6.2 Mögliche Alternativen

6.2.1 Allgemeines

Zur Prüfung der Eignung einer Schutzlage ist zur Verbesserung der derzeitigen Situation ein Test wünschenswert, mit dem reproduzierbare und für eine Bewertung taugliche - weil auf die Einsatzbedingungen übertragbare - Werte geliefert werden können. Ein derartiger Versuch muß die relevanten Parameter erfassen und sollte dabei möglichst einfach im Labor durchzuführen sein. Da der Zeitstandlastplattendruckversuch - wie

gezeigt - einige dieser für einen aussagefähigen Eignungstest zu fordernden Bedingungen wegen der Vielzahl der den Versuchsablauf beeinflussender Zufallsgrößen nur unzureichend erfüllen kann, ist die Entwicklung eines abstrahierenden Versuches (Indexversuch) zu empfehlen. Ein solcher Versuch, der idealerweise möglichst nur eine Größe als Ergebnis produziert, sollte nachvollziehbar und begründet, soweit wie bei der Aufgabenstellung vertretbar, vereinfacht sein.

Im folgenden werden zwei Vorschläge entwickelt, wie Indexversuche möglicherweise aussehen könnten, welche experimentell Werte liefern, die auf eine einfachere Art und Weise Rückschlüsse auf die Schutzwirksamkeit der getesteten Produkte ermöglichen. Beide Ansätze beinhalten die im weiteren erläuterten Vereinfachungen.

Die mechanische Beanspruchung einer Schutzlage ergibt sich aus der Belastung infolge Müllauflast und der Beschaffenheit der Dränageschicht. Die Höhe der Belastung ist wegen der in der Regel genau bekannten, geplanten Schütthöhe und der abschätzbaren zu erwartenden Wichte des Mülls von zur Zeit etwa $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ (siehe z.B. DRESCHER [35]) sehr genau vorhersagbar. Die Abschätzung der maßgeblichen Korngröße oder Kornform des Dränagekieses gestaltet sich hingegen schwieriger. Die Unwägbarkeiten, die aus der zufälligen Kornanordnung erwachsen, machen daher bei der Entwicklung eines Versuches, der reproduzierbare Ergebnisse liefern soll, einen Ersatz des Kiesel durch einen sinnvoll profilierten Stempel erforderlich.

Die Wahl eines idealisierten, den Kies ersetzenden Belastungskörpers, mit dem das zu erwartende ungünstigste Korn simuliert werden kann, läßt sich zum Beispiel nach den folgend beschriebenen Beobachtungen herleiten und begründen. Unabhängig davon, ob als Kies ein sogenanntes Rundkorn oder ein gebrochenes Korn eingesetzt werden soll, kann nach Ansicht des Verfassers von ein und derselben ungünstigsten Kornform ausgegangen werden, da sich in jedem Kies Einzelkörner finden, die scharfe Kanten und Ecken aufweisen. Wie sich bei der Vielzahl der durchgeführten Druckversuche gezeigt hat, stellen jedoch nicht die gelegentlich anzutreffenden, messerscharfen Kanten einzelner Körner die hervorzuhebende Belastung dar. In allen Fällen, bei denen zum Teil selbst nur ein relativ leichtes Geotextil als Schutzlage verwendet wurde, konnte

- nach der visuellen Beurteilung - bei keinem der bisher am Institut für Grundbau und Bodenmechanik durchgeführten Versuche der erkennbare Abdruck einer solchen scharfen Kante, im Gegensatz zu Abdrücken mit abgerundeten Kanten, aus der Vielzahl der Deformationen unterschieden werden. Beschädigungen der Oberfläche der Dichtungsbahnen traten in keinem der mit Geotextilien $> \approx 600 \text{ g/m}^2$ durchgeführten Versuche auf. Die gravierendsten Verformungen sind an den Stellen zu beobachten, wo sich aufgrund der Geometrien benachbarter Körner oder durch Brückenbildungen Zwischenräume zwischen den Kieskörnern ergeben (siehe dazu auch WITTE [36]). Je größer diese Abstände sind, um so größer ist die Beanspruchung der Schutzlage und der Dichtungsbahn.

Demzufolge erscheint es ausreichend, einen Belastungskörper zu wählen, der von den Abmessungen an dem orientiert ist, was in den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen als Abdruck den kleinsten, registrierten Krümmungsradius hinterlassen hat. Dieser minimale Krümmungsradius $r_{\min}$ ergab sich, bei Heranziehung aller in dieser Arbeit erfaßten Versuche, bei dem ohne Schutzlage durchgeführten Versuch GED01 zu $r_{\min} = 8,6 \text{ mm}$. Eine Kugel mit einem Durchmesser von ca. 16 mm könnte somit, auf der Basis von Versuchsergebnissen begründet, zur Simulation der wirksamen ungünstigsten Kornform eines Kiesel 16/32 verwendet werden.

6.2.2 Alternativen zum Zeitstandlastplattendruckversuch

6.2.2.1 Versuch mit Gruppen von Belastungskörpern (Laststempelversuch)

Die Wirksamkeit einer Schutzlage im Zusammenspiel mit den Eigenschaften der anderen am Lastabtrag beteiligten Komponenten läßt sich in ihrer Komplexität am ehesten in einem Versuch bestimmen. Um die zwischen den Aufstandspunkten der Einzelkörner wirkenden lastverteilenden Effekte zu erfassen, sollten dabei Korngruppen simuliert werden. Eine mögliche Anordnung könnte die kreisförmig um einen zentral angeordneten Körper (Kugel $\phi 16 \text{ mm}$) angelegte Plazierung weiterer gleichartiger Belastungskörper sein, wie in ähnlicher Form bereits von SAATHOFF (et al.) beschrieben (siehe dazu [37], [38]). Der Abstand der Belastungskörper untereinander wäre entsprechend der zu simulierenden Körnung zu variieren.

Als Untergrund könnte, wie beim Zeitstandlastplattendruckversuch, ein Elastomer oder ein natürlicher Boden eingesetzt werden, auf den wie bisher ein Weichblech zur Konservierung der Verformungen unter der Kunststoffdichtungsbahn anzuordnen ist. Eine Auswertung wäre durch Vermessung der eingepprägten Verformungen vorzunehmen.

Mit einem solchen Versuch ließen sich gleichermaßen rein geotextile Schutzlagen (Vlies, Verbundstoff), kombinierte Schutzschichten (z.B. Bentonitmatte, Sandmatte) oder auch separat zweischichtige Systeme (Vlies/Sand, Vlies/Kies) nach dem gleichen Prozedere untersuchen.

Erste Versuche mit einem in Bild 102 dargestellten Belastungsstempel ergaben, daß ein Abstand von ca. 24 mm – als mittlerer Wert zwischen dem bei ideal runder Kornform möglichen minimalen (16 mm) und maximalen (32 mm) Abstand (für einen Kies 16/32) – keine wirklichkeitsnahen Ergebnisse ergibt. Die registrierbaren Verformungen waren wesentlich geringer, als sie nach den Resultaten entsprechender Zeitstandlastplattendruckversuche hätten ausfallen müssen.

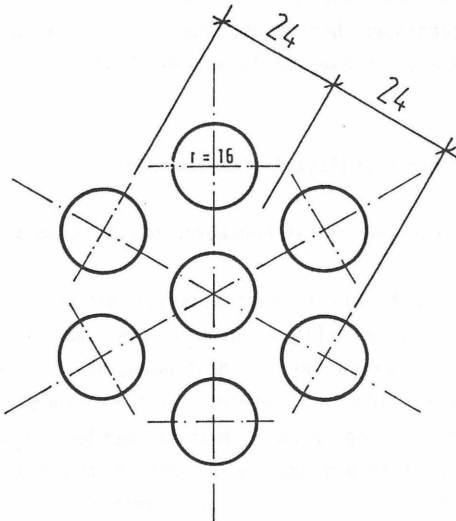


Bild 102: Belastungsstempel mit sieben Belastungskörpern für einen vereinfachten Belastungsversuch

Aufgrund dieser ersten Ergebnisse wurde der Belastungsstempel durch Reduzierung der Anzahl der Belastungskörper von ursprünglich 7 auf nunmehr 3 verändert. Der Abstand dieser Körper untereinander betrug bei dieser Konstellation ca. 42 mm. Bild 103 zeigt den veränderten Stempel.

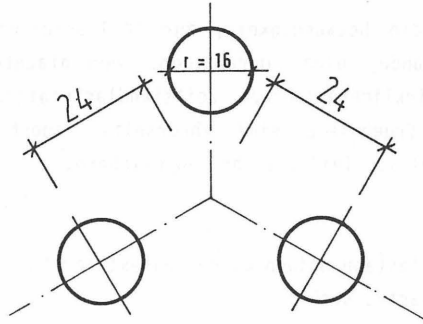


Bild 103: Belastungsstempel mit drei Belastungskörpern für einen vereinfachten Belastungsversuch

Mit diesem Belastungsstempel wurden auf einer Elastomerunterlage erneut Vorversuche mit der Schutzlage C (2.000 g/m^2 PEHD-Verbundstoff) und mit der Schutzlage D (3.000 g/m^2 PEHD-Verbundstoff) durchgeführt. Dazu wurde – wie bei den vorangegangenen Zeitstandlastplattendruckversuchen – eine Belastung aufgebracht, die einer Spannung von 1 MN/m^2 entspricht. Die Schutzlage D wurde einfach und doppelt auf die Dichtungsbahn gelegt. Jeder Teilversuch wurde wiederholt. Zur Berechnung der Dehnungen unter Zugrundelegung eines Kreisabschnittes erfolgte eine Vermessung der Verformungen. Die Ergebnisse dieser Auswertung (Mittelwerte) sind in der Tabelle 30 den Werten aus entsprechenden Zeitstandlastplattendruckversuchen (Drucktopf) gegenübergestellt.

Schutzlage PEHD- Verbundstoffe	maximale Dehnungen ϵ [%]	
	Belastungsstempel	Drucktopf
C 2.000 g/m^2	2,0	4,8
D 3.000 g/m^2	1,8	3,8
D doppelt	0,25	1,7

Tabelle 30: Maximale Dehnungen aus Versuchen mit Belastungsstempel

Wie aus den Ergebnissen ersichtlich ist, kann mit dem einfachen Versuchsaufbau selbst mit einem Abstand von ca. 42 mm zwischen den drei einzelnen Belastungspunkten keine Beanspruchung der Dichtungsbahn erreicht werden, wie sie bei vergleichbaren Belastungsverhältnissen durch eine Kiesschüttung der Körnung 16/32 hervorgerufen wird.

Die Resultate zeigen die Notwendigkeit, zur "Kalibrierung" (Wahl der Kugeldurchmesser, Abstände) eines derartigen, vereinfachten Versuches Ergebnisse aus dem wirklichkeitsnahen Zeitstandlastplattendruckversuch heranzuziehen. Diese Ergebnisse sind ihrerseits jedoch durch eine entsprechend hohe Anzahl von Teilversuchen abzusichern.

6.2.2.2 Bestimmung der lastabhängigen Dicke geotextiler Schutzschichten in einem Punktlastversuch

Eine noch weiter vereinfachte Prüfung könnte darin bestehen, die lastabhängig unter einem Prüfkörper verbleibende Dicke der zu testenden Schutzlage zu bestimmen. Diese Dicke, die eine Vergrößerung des Kornes bedeutet - welches mit dem Geotextil an der Unterseite umhüllt wird - und die für die Lastabtragung wirksame Aufstandsfläche vergrößert, ist das bedeutendste Maß für die mit einem Geotextil erreichbare Schutzwirkung (vergl. [16]).

Die Bilder 104.1 und 104.2 zeigen exemplarisch die Ergebnisse solcher Versuche, bei denen die lastabhängig verbleibende Dicke von zwei, in den zuvor beschriebenen Versuchsserien bereits verwendeten PEHD-Verbundstoffen, mit einem Flächengewicht von 2.000 g/m^2 (Schutzlage C), bzw. 3.000 g/m^2 (Schutzlage D), registriert wurde. Als Belastungskörper kamen bei diesen Punktlastversuchen eine Kugel $\phi 22 \text{ mm}$, eine Kugel $\phi 32 \text{ mm}$ und ein Zylinder $\phi 20 \text{ mm}$ zum Einsatz. Die Belastung war an den in einer Deponie zu erwartenden Auflasten orientiert und entsprach den Kräften, die sich für einen einzelnen Belastungskörper unter der Voraussetzung ergeben würde, daß eine Fläche so eng wie möglich mit Körpern derselben Abmessungen bedeckt ist. Bild 104.1 zeigt die Ergebnisse der mit der Schutzlage C durchgeführten Versuche. In Bild 104.2 sind die entsprechenden Ergebnisse für Schutzlage D wiedergegeben.

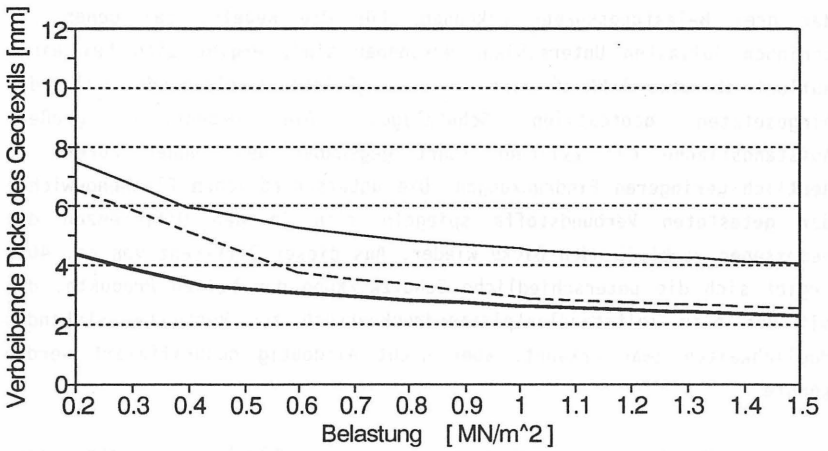
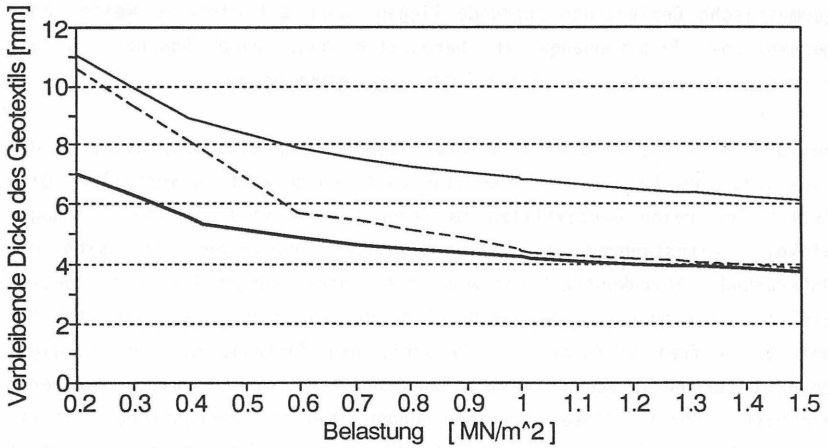


Bild 104.1: Lastabhängige Dicke der Schutzlage C,
bei Verwendung verschiedener Belastungskörper



--- Kugel 22 mm — Kugel 32 mm — Zylinder 20 mm

Bild 104.2: Lastabhängige Dicke der Schutzlage D,
bei Verwendung verschiedener Belastungskörper

Die Darstellungen der Ergebnisse lassen die unterschiedlichen Wirkungen der drei Belastungskörper erkennen. Für die Kugeln, bei denen bei geringen Auflasten Unterschiede erkennbar sind, ergibt sich bei einer Auflast ab etwa 1 MN/m^2 eine in etwa gleiche verbleibende Dicke der eingesetzten geotextilen Schutzlagen. Die wesentlich größere Aufstandsfläche der Zylinder führt gegenüber den runden Formen zu deutlich geringeren Eindrückungen. Die unterschiedlichen Flächengewichte der getesteten Verbundstoffe spiegeln sich in den Differenzen der gemessenen verbleibenden Dicke wieder. Aus dieser Differenz von ca. 40 % ergibt sich die unterschiedliche Schutzwirkung der beiden Produkte, die mit den beim Zeitstandlastplattendruckversuch zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zwar erkannt, aber nicht eindeutig quantifiziert werden konnte.

Mit der Kenntnis der unter einer Last verbleibenden Dicke eines Geotextils läßt sich bei Ansatz gewisser Vereinfachungen die langfristige zu erwartende Dehnung der mit diesem Element geschützten Kunststoffdichtungsbahn berechnen. Nach dieser Berechnung, der ausschließlich rein geometrische Beziehungen zugrunde liegen, kann auf einfache Weise, ohne mechanische Zusammenhänge zu berücksichtigen, eine Abschätzung der Wirkung einer geotextilen Schutzlage vorgenommen werden.

Bei diesem Ansatz wird vorausgesetzt, daß die Schutzschicht nicht in der Lage ist, innerhalb ihrer Dicke eine Last nennenswert zu verteilen. Dies trifft für reine Geotextilien im Gegensatz zu Sand (Lastausbreitungswinkel) weitestgehend zu. Es wird weiter angenommen, daß sich der Untergrund volumenkonstant verformt, d.h. Eindrückungen führen an anderer Stelle zu Hebungen gleicher Größe. Eine dritte Annahme ist, daß sich der Untergrund frei verformt (wie Wasser), ein Zustand, der bei bindigen Böden unter entsprechend schnell aufgebrachten, hohen Lasten annähernd eintritt. Durch diese Vereinfachungen werden mechanische Effekte vollständig eliminiert, so daß bei den weiteren Überlegungen lediglich rein geometrische Beziehungen zwischen den einzelnen Größen berücksichtigt werden können.

Für die weiteren Betrachtungen wird das im Bild 105 dargestellte Belastungsbild zugrunde gelegt. Als für die maximale Beanspruchung maßgebende Korngröße wird ein Korn $\phi 16 \text{ mm}$ (für eine Körnung 16/32

kleinster Durchmesser - idealisiert als Kugel) angesetzt. Als Abstand zwischen zwei Einzelkörnern wurde ein für eine Körnung 16/32 als mittlerer Wert ansetzbares Maß von 24 mm gewählt. Diese Annahme stützt sich auf die Ergebnisse aus den mit Kugeln verschiedener Größe als Belastungskörper durchgeführten Versuchsreihe mit künstlichen Belastungsbildern (s. Abschnitt 5.8.3).

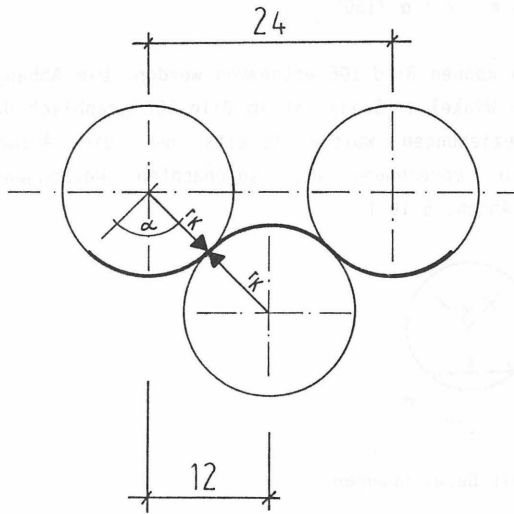


Bild 105: Idealisiertes Belastungsbild (Modell)

Unter einer ausreichend hohen Belastung prägen sich die Körner in den Untergrund ein und verdrängen diesen in die zwischen den Kugeln verbleibenden Zwickel. Die den Untergrund abdeckende Dichtungsbahn verformt sich entsprechend der Kugelgeometrie und wölbt sich im Zwischenraum der Belastungskörper auf. Die Form der Aufwölbung wird für die folgenden Berechnungen gleich der durch die Kugeln eingepprägten Vertiefungen angenommen. Diese Annahme läßt sich aus den Auswertungen der Abtastungen vieler im Zeitstandlastplattendruckversuch verformter Bleche begründen, bei denen über die Probenfläche im Mittel etwa immer gleich große konkave (Eindrückung) und konvexe (Aufwölbung) Krümmungen (Krümmungsradien) festgestellt wurden. Diese Annahme bedeutet - bei Betrachtung eines ebenen Schnitts - zudem eine volumenkonstante Verformung des Untergrundes.

Bei Definition der Dehnung ϵ als Unterschied zwischen der Sehnenlänge s und der Bogenlänge b eines Kreisabschnittes läßt sich - ausgedrückt in der Abhängigkeit vom Öffnungswinkel α - die folgende Beziehung ableiten:

$$\epsilon(\alpha) = [(\pi \cdot \alpha^\circ / 180^\circ) / (2 \cdot \sin(\alpha/2))] - 1 \quad (12)$$

Sehnenlänge $s = 2 \cdot r \cdot \sin(\alpha/2)$

Bogenlänge $b = \pi \cdot r \cdot \alpha^\circ / 180^\circ$

Die Bezeichnungen können Bild 106 entnommen werden. Die Abhängigkeit der Dehnung ϵ [%] vom Winkel α [Grad] ist im Bild 107 graphisch dargestellt. Die gleichen Beziehungen wurden bereits bei der Auswertung des Wölbversuches zur Berechnung der sogenannten Wölbbogendehnung ϵ_{wb} verwendet, siehe Abschn. 5.10.1.

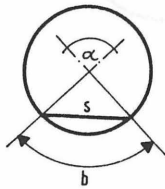


Bild 106: Kreis mit Bezeichnungen

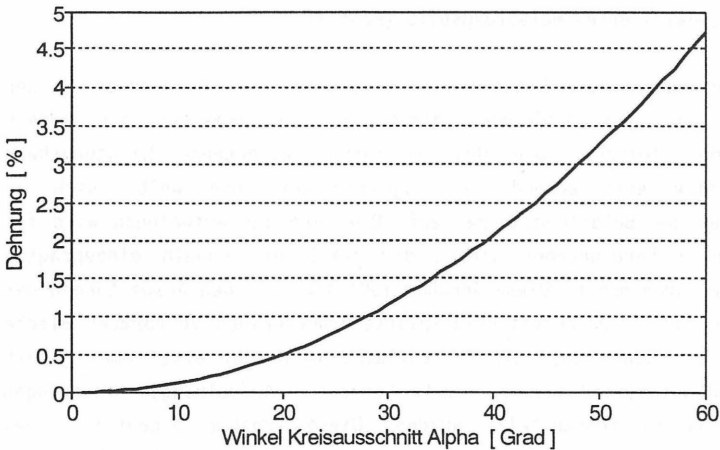


Bild 107: Dehnung ϵ in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel α

Nach den in Bild 105 dargestellten geometrischen Beziehungen läßt sich der Winkel α bestimmen zu

$$\sin(\alpha/2) = 12 / (2 \cdot r_K) \quad (13)$$

Eine Schutzlage vergrößert den Radius r_K [mm] um das Maß der unter Auflast verbleibenden Dicke d_{Rest} [mm]. Da die Abstände der Körner unverändert bleiben, verkleinert sich der Winkel α . Die für diese Konstellation geltende Abhängigkeit von d_{Rest} und α ist zusammen mit dem bereits in Bild 107 dargestellten Zusammenhang von ϵ [%] und α [Grad] in Bild 108 wiedergegeben (ϵ/d_{Rest} -Diagramm). Der Pfeil zeigt die Art der Ablesung (Verknüpfung von $\epsilon(\alpha)$ und d_{Rest}).

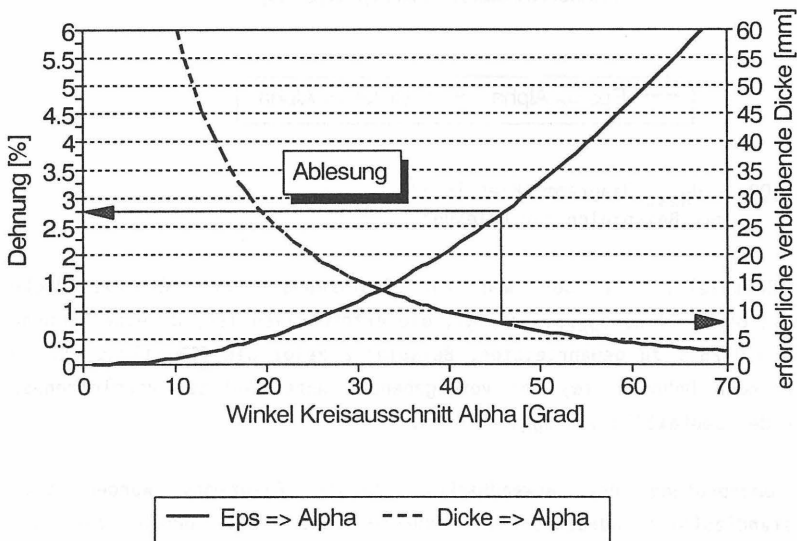


Bild 108: Abhängigkeit von Dehnung $\epsilon(\alpha)$ und Geotextildicke d_{Rest}

Bild 109 zeigt einen Ausschnitt aus Bild 108, der so gewählt ist, daß nur der für die Abschätzung der Wirkung eines Geotextils interessante Bereich erfaßt ist. Auf die mit den Pfeilen beispielhaft demonstrierte Art läßt sich aus dieser Graphik die für die zugrundegelegten Verhältnisse geltende Beziehung zwischen der unter Last verbleibenden Dicke eines Geotextils d_{Rest} und der sich daraus ergebenden Dehnung $\epsilon(\alpha)$ abgreifen.

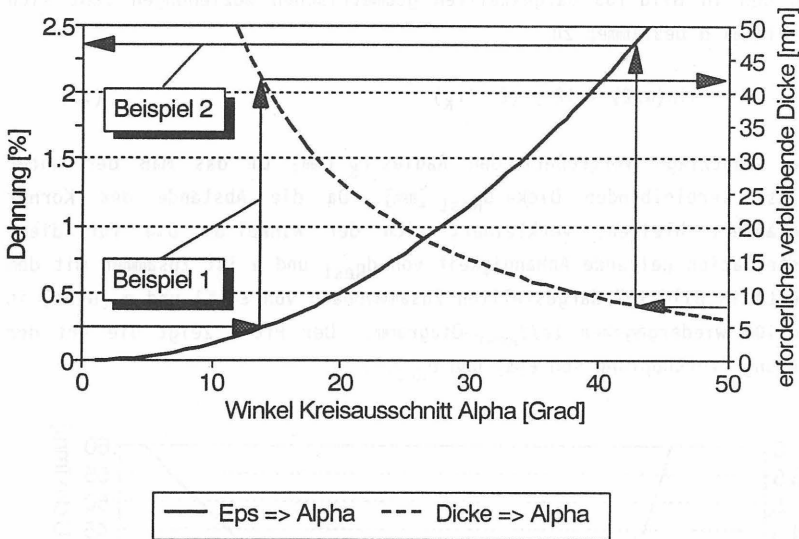


Bild 109: ϵ/d_{Rest} -Diagramm, Kies 16/32
mit Beispielen zur Ablesung

Als Beispiel 1 ist der Weg zur Bestimmung einer Geotextildicke (verbleibende Dicke d_{Rest}) gezeigt, die erforderlich ist, um eine Dehnung von $\epsilon = 0,25\%$ zu gewährleisten. Beispiel 2 zeigt die Ermittlung der zu erwartenden Dehnung $\epsilon(\alpha)$ bei vorgegebener, unter Auflast verbleibender Dicke des Geotextils von $d_{\text{Rest}} = 8\text{ mm}$.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit dieses Diagramms wurden vier Zeitstandlastplattendruckversuche durchgeführt, bei denen das als Schutzlage D bezeichnete Geotextil zur Variation der verbleibenden Dicke d_{Rest} mehrlagig eingelegt wurde. Die für eine Lage unter einer Belastung von 1 MN/m^2 festgestellte Restdicke von $d_{\text{Rest}} \approx 4\text{ mm}$ (s. Bild 104.2) wurde durch Verwendung von 2, 3, 4 und 8 übereinandergelegten Lagen auf etwa 8, 12, 16 und 32 mm vergrößert. In der Tabelle 31 sind die in diesen Versuchen ermittelten maximalen Dehnungen zusammengestellt.

Bild 110 zeigt diese Ergebnisse eingetragen in das ϵ/d_{Rest} -Diagramm. Die markierten Punkte wurden dabei soweit über der Abszisse verschoben, daß

die Plazierung direkt der zugehörigen verbleibenden Dicke d_{Rest} entspricht und die Zuordnung der festgestellten maximalen Dehnung $\epsilon(\alpha)$ durch Verwendung der die $\epsilon \Leftrightarrow \alpha$ Beziehung darstellenden Kurve möglich ist.

Versuch Bezeichnung	Schutzlage D Lagen	d_{Rest}	max. Dehnung [%]
GEDD2	1-lagig	4 mm	4,6
GED2D	2-lagig	8 mm	1,9
GED3D	3-lagig	12 mm	1,7
GED4D	4-lagig	16 mm	0,6
GED8D	8-lagig	32 mm	0,4

Tabelle 31: Maximale Dehnungen bei mehrlagigen Schutzlagen

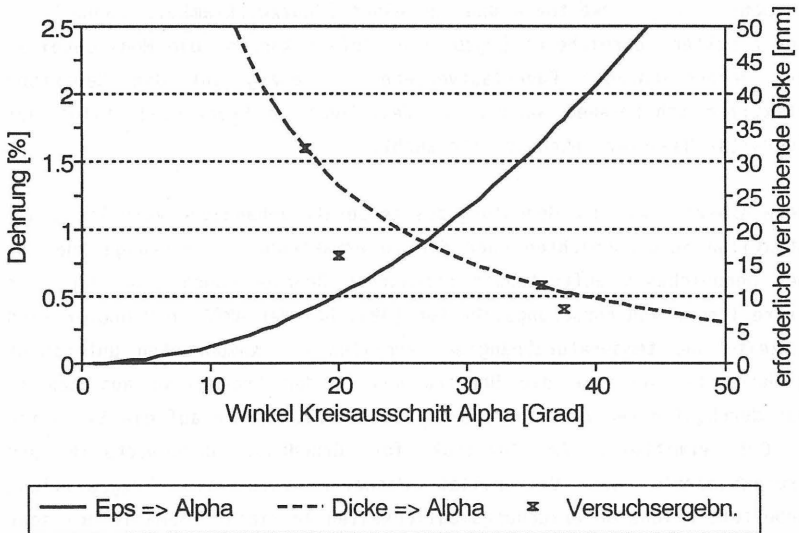


Bild 110: ϵ/d_{Rest} -Diagramm mit Versuchsergebnissen

Die experimentell erzeugten Ergebnisse zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den theoretisch zu erwartenden Größen. Die vergleichsweise geringeren Dehnungen aus den Versuchen GED2D und GED4D könnten in den versuchsbedingten Streuungen bei der Ermittlung der für

die jeweilige Versuchskonstellation tatsächlich zutreffenden maximalen Dehnung begründet sein.

Diese ersten Ergebnisse sind noch durch weitere Zeitstandlastplatten-druckversuche abzusichern. Die Bestimmung der unter Last verbleibenden Dicke einer geotextilen Schutzlage könnte – wie dargestellt – jedoch eine aussagekräftige Größe bei der Beurteilung der erreichbaren Schutzwirkung sein.

6.2.3 Empfehlungen und Ausblick

Derzeit läßt sich noch nicht absehen, ob einfache Tests, wie beispielsweise die beiden vorgestellten Alternativen, für die Aufgabenstellung verwertbare und für einen Schutzwirksamkeitsnachweis in allen Aspekten ausreichende Ergebnisse liefern können. Die Möglichkeiten stark vereinfachender Punktlastversuche in bezug auf die Bewertung geotextiler Schutzlagen werden zur Zeit auch am Franzius-Institut der Universität Hannover intensiv untersucht.

Andere Aspekte, wie die Bedeutung des temperaturabhängigen Verhaltens der geotextilen Schutzschichten oder die zu erwartenden Auswirkungen der an einer Deponiebasis auftretenden chemischen Beanspruchung sind zur Zeit weitere Themen von Forschungsarbeiten [39]. Bei der AMPA in Hannover wird das zeit- und temperaturabhängige Verhalten der Komponenten untersucht und durch Feldversuche die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den im Labor durchgeführten Zeitstandlastplattendruckversuchen auf die Situation vor Ort ermittelt. Am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover wird die Fragestellung bearbeitet, welche Untersuchungsmöglichkeiten zu dieser Thematik bei sehr hohen Auflasten angewendet werden können. Arbeiten bei der BAM in Berlin befassen sich darüber hinaus mit der chemischen Beständigkeit der als Schutzschichten eingesetzten Produkte.

Bei allen diesen Untersuchungsprogrammen spielt der Zeitstandlastplatten-druckversuch eine wesentliche Rolle, um die Wirkung einzelner Veränderungen bestimmen zu können. Daß der Versuch bei einer angepaßten Auswertemethodik für einen solchen Zweck geeignet ist, wurde

in der vorliegenden Arbeit gezeigt. Für den projektbezogenen Nachweis der Wirksamkeit einer geplanten Schutzlage ist jedoch zu empfehlen, vereinfachte Indexversuche, wie die beiden beispielhaft vorgestellten Ansätze von Laststempel- und Punktlastversuchen - weiter zu entwickeln. Die Übertragbarkeit derartiger Tests kann mit Hilfe der Zeitstandlastplattendruckversuche belegt werden.

Der Aufwand der Untersuchungs- und Auswertemethoden sowie die eigentliche Bewertung der Versuchsergebnisse werden in einem hohen Maße von dem nachzuweisenden Grenzwert bestimmt. Die Festsetzung der maximal feststellbaren Dehnung mit $\max \epsilon = 0,25 \%$ als alleiniges Kriterium erfordert aufwendige Verfahren. Eine Anhebung dieses Grenzwertes auf $\epsilon_{zul} = 1 \%$ brächte bereits eine deutliche Verbesserung der Situation und wäre nach Ansicht des Verfassers technisch aus den folgend dargelegten Gründen vertretbar.

Der Zeitstandlastplattendruckversuch und auch die angestrebten Indexversuche sind im Blick auf die Eigenschaften der verwendeten Materialien als Kurzzeitversuche einzustufen. Die Prüflasten und damit die Verformungen werden ohne zeitliche Verzögerung aufgebracht, so daß entsprechend hohe Spannungen in der Dichtungsbahn erzeugt werden. Eine Deponie wird dagegen über einen wesentlich längeren Zeitraum bis auf Maximalhöhe aufgeschüttet. Die Dehnungen und damit einhergehend die zugehörigen Spannungen entstehen somit vor Ort erst im Laufe der Zeit. Über sofort einsetzende Relaxationsvorgänge findet bei dieser Art der Belastung ein Spannungsabbau in der Dichtungsbahn statt, der nur zu einer abgeschwächten Beanspruchung der Kunststoffdichtungsbahn führt.

In Bild 111 ist eine über fünf Jahre ($\approx 4,4 \cdot 10^4$ Stunden) linear angenommene zeitliche Entwicklung der Dehnungen bis auf Maximalwerte von 1 % (linke Ordinatenachse) und 1,5 % (rechte Ordinatenachse) dargestellt. Bild 112 zeigt die zeitliche Entwicklung der Spannungen infolge der zeitlich ansteigenden Dehnungen am Beispiel einer Dichtungsbahn aus Hostalen GM 5040 T12, nach [18].

Bei einer linear anwachsenden, nach fünf Jahren mit $\epsilon = 1 \%$ als Höchstwert angenommen Dehnung stellt sich nach ca. 2 Jahren eine maximale Spannung von ca. $\sigma = 1,5 \text{ N/mm}^2$ ein. Diese Spannung dürfte etwa der

Spannung entsprechen, welche bei einer sehr schnell aufgebrachten Dehnung von $\epsilon = 0,25\%$ in der Dichtungsbahn geweckt wird.

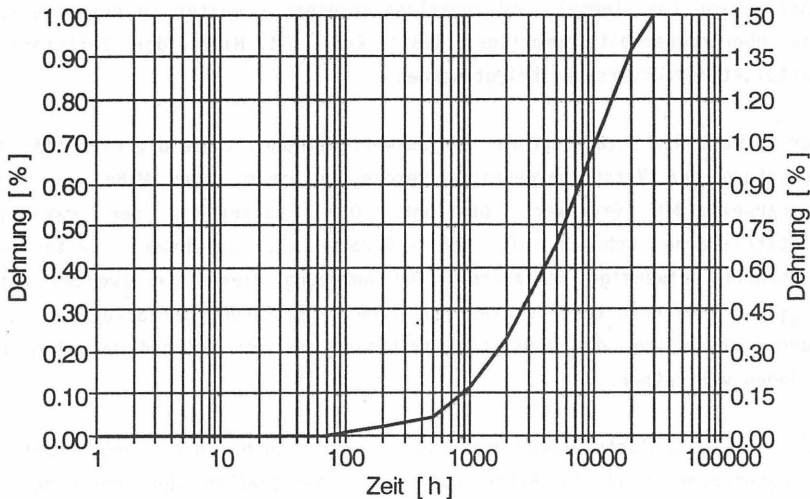


Bild 111: Zeitliche Entwicklung der Dehnung

Wie bereits zu Beginn der Arbeit gezeigt wurde, können nur aufgrund von Setzungsdifferenzen einer sich gleichmäßig verhaltenden Deponiebasis keine Dehnungen entstehen, die auch nur annähernd die Größenordnung erreichen, die allgemein mit 3 % als für eine Dichtungsbahn unschädlich angesehen werden. Vor diesem Hintergrund könnten bei normalen Verhältnissen durchaus 1 % für die Belastung durch die Drainagekörnung abgetreten werden.

Bei lokalen Störungen, die zu einer höheren Beanspruchung führen würden, können sich die verursachten Dehnungen nicht über größere Bereiche verteilen, da die Belastungen an der Deponiebasis keine Materialwanderungen aus weniger beanspruchten Zonen zulassen. Solche kleinräumigen Störungen beeinflussen somit nur einen relativ kleinen Teil der Basisfläche. In derartigen Bereichen werden die Dehnungen, die allein durch diese Störungen verursacht sind, in der Regel so dominieren, daß der geringe, durch die Drainagekörnung verursachte Anteil, unbedeutend ist. Eine Überbeanspruchung der Kunststoffdichtungsbahn ist daher eher

durch eine sorgfältige Auswahl des Standortes und Herrichtung des Deponieplanums zu gewährleisten, als durch Formulierung äußerst enger Grenzen für eine im Vergleich zu anderen Einflüssen relativ sicher abschätzbaren Beanspruchung.

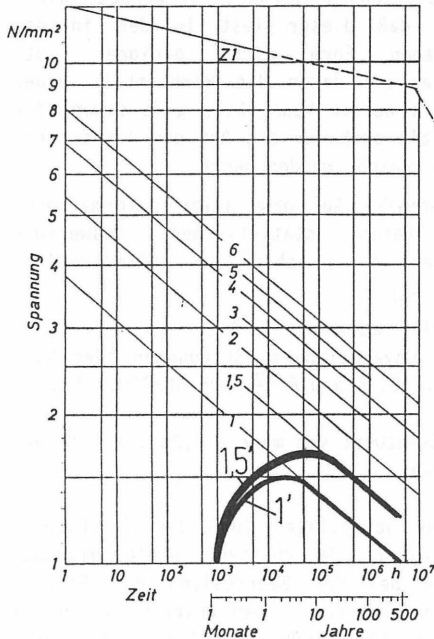


Bild 112: Entwicklung der Spannungen, nach [18]

1 - 6: Spannungsrelaxation
1' und 1,5': Spannungsverlauf

Um die Erhaltung einer unter den anzusetzenden Beanspruchungen dauerhaften Funktionstüchtigkeit der Kunststoffdichtungsbahn zu gewährleisten, ist zu empfehlen, zusätzlich zu der Begrenzung der Dehnung das Verhalten unter einer permanent wirkenden ungleichmäßigen Druckbeanspruchung zu prüfen. Während die durch die Dehnungen erzeugten Spannungen im Laufe der Zeit gegen Null relaxieren, bleiben die örtlichen Druckbeanspruchungen dauerhaft bestehen.

Als Empfehlungen für die Prüfung von Schutzlagen für Kunststoffdichtungsbahnen können nach Auswertung der eigenen Versuchsreihen und anderer, bisher vorliegender Ergebnisse zum Abschluß somit folgende Punkte zusammengefaßt werden:

- Wenn der Zeitstandlastplattendruckversuch verwendet wird, sollte beachtet werden, daß dieser Test in der in den Richtlinien vorgeschlagenen Form nicht geeignet ist, Ergebnisse zu liefern, anhand derer die Wirksamkeit einer Schutzlage sicher beurteilt werden kann. Dies gilt sowohl für die Versuchsdurchführung als auch für die Art der Auswertung. Eine Verbesserung könnte erreicht werden durch
 1. eine möglichst flächenhafte Aufnahme aller Deformationen mit einer nachgeschalteten statistischen Auswertung (Vermessung über mindestens sechs Achsen mit Meßintervallen $\leq 5\text{mm}$, bei einem Kies 16/32)
 2. Durchführung von jeweils mehreren Teilversuchen (mind. 3 bis 5) zur Erfassung der unvermeidbaren Streuungen oder Vergrößerung der Prüffläche (z.B. $A \geq 0,6\text{ m}^2$ nach SCHRÖDER [21])
- Der bisher anzusetzende Grenzwert von $\max \epsilon = 0,25\%$ sollte auf $\epsilon_{\text{zul}} = 1\%$ angehoben werden.
- Das Verhalten geotextiler Schutzlagen (und der Kunststoffdichtungsbahn) unter einer dauerhaften ungleichmäßigen Druckbeanspruchung sollte bei der Beurteilung der Schutzwirksamkeit berücksichtigt werden. Bei den Untersuchungen ist von einer Temperatur von $40 - 60^\circ\text{C}$ an der Deponiebasis (Hausmüll) auszugehen.
- Um vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse mit einem vertretbaren versuchstechnischen Aufwand zu erhalten, sollten abstrahierende Indexversuche, die in Ansätzen bereits existieren, weiterentwickelt werden. Die Übertragbarkeit ist durch Paralleluntersuchungen mit dem Zeitstandlastplattendruckversuch zu überprüfen.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der zum Nachweis einer ausreichenden Wirksamkeit von Schutzlagen für Kunststoffdichtungsbahnen einzusetzende Zeitstandlastplattendruckversuch auf seine Verwendbarkeit untersucht. Es wurden Versuchsreihen zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und zu Ermittlung der Sensibilität der Versuchsdurchführung und -auswertung im Hinblick auf die Unterscheidung der Effekte unterschiedlicher Schutzlagen durchgeführt. Zu einer objektiven Beurteilung kam ein speziell entwickeltes Abtast- und Auswerteverfahren zum Einsatz.

Durch theoretische Betrachtungen und praktische Versuche wurde dargelegt, daß das verwendete rechnergesteuerte Abtast- und Auswerteverfahren geeignet ist, objektive Ergebnisse für eine zuverlässige Beurteilung der Proben zu liefern. Die Schwankungen dieses Verfahrens sind wesentlich geringer als die empfohlene Auswertung der manuellen Vermessung.

Die durchgeführten Versuchsreihen zeigen, daß der Zeitstandlastplattendruckversuch in der empfohlenen Form nicht geeignet ist, die Wirksamkeit einer zu testenden Schutzlage in nur einem Teilversuch sicher nachzuweisen. Bei einer flächenhaften Aufnahme der Verformungen und einer entsprechenden Auswertung mehrerer Teilversuche können jedoch Unterschiede in der Wirkung verschiedener Schutzlagen erkannt und sowohl qualitativ unterschieden als auch quantitativ verglichen werden.

Da derzeit noch keine echte Alternative zum Zeitstandlastplattendruckversuch entwickelt ist, sollten für eine aussagefähige Schutzwirksamkeitsprüfung immer mehrere Parallelversuche (Teilversuche) durchgeführt werden, die jeweils möglichst flächendeckend mit einem objektiven Verfahren auszuwerten sind.

Für eine weniger aufwendige Versuchsdurchführung wird die Weiterentwicklung von vereinfachten Versuchen (Indexversuche) empfohlen, von denen in dieser Arbeit verschiedene mögliche Ansätze vorgestellt werden. Bei der Entwicklung derartiger Indexversuche ist der Zeitstandlastplattendruckversuch trotz seiner Unzulänglichkeiten jedoch weiterhin als ein wichtiges Hilfsmittel anzusehen, mit welchem die

Übertragbarkeit der Ergebnisse durch entsprechende Parallelversuche überprüft werden kann.

Es ist zu erwarten, daß die zur Zeit laufenden Forschungsarbeiten, die einen Großteil der angesprochenen Aspekte behandeln, weitere Ergebnisse liefern und in ihrer Gesamtheit eine Bemessung der Schutzschicht unter Berücksichtigung der für jede Deponie wechselnden Einsatzbedingungen auf abgesichertere Grundlagen stellen werden. Bis dahin muß bei der Auswahl von Materialien und Produkten mit Hilfe experimenteller Eignungsnachweise durch auf der sicheren Seite liegende Beurteilungskriterien dafür Sorge getragen werden, daß nur solche Komponenten Verwendung finden, welche die Anforderungen über die zugedachten Zeiträume erfüllen können.

Literatur

- [1] N.N. Deponiebasisabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen Landesamt für Wasser und Abfall, NRW, Mai 1985
- [2] N.N. Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsabdichtung für Siedlung- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Stand Februar 1992
- [3] N.N. RdErl. d. MU vom 24.06.1988 - 207 - 62812/21 - (Gültl 30/36), Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle, Niedersachsen
- [4] N.N. Entwurf einer Richtlinie über mineralische Deponieabdichtungen, LWA Nordrhein-Westfalen, Juli 1990
- [5] N.N. LAGA-Merkblatt M 3, Die geordnete Ablagerung von Abfällen, Entwurf, Stand Februar 1990
- [6] N.N. TA-Sonderabfall
- [7] N.N. Entwurf TA-Siedlungsabfall
- [8] KNIPSCHILD Werkstoffauswahl und Dimensionierung von Kunststoffdichtungsbahnen für Grundwasserschutzmaßnahmen, Beiheft 22, Müll und Abfall, 1985
- [9] SEHRBROCK Schutzwirkung von Geotextilien, 8.Fachtagung "Die sichere Deponie", SKZ, Würzburg, Februar 1992
- [10] SEHRBROCK Schutzwirkungen von Geotextilien im Deponiebau, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 30, 1989

- [11] N.N. Das Geotextil-Handbuch, SVG Schweizerischer Verband der Geotextilfachleute, 2. Auflage, September 1988
- [12] N.N. DIN 54 307, Stempeldurchdruckversuch
- [13] SAATHOFF Geokunststoffe in Dichtungssystemen - Laboruntersuchungen zum Verhalten von Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen -, Heft 72, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, 1991
- [14] PUEHRINGER Anwendung von Geotextilien im Deponiebau, Technische Akademie Esslingen, Mai 1987
- [15] STEFFEN Geotextilien in der Deponietechnik, Haus der Technik e.V., Februar 1987
- [16] KNIPSCHILD, SAATHOFF, BASSEN
Kunststoffdichtungsbahnen mit und ohne Schutzvliesstoffe unter Punktlasten, 1. Kongreß "Kunststoffe in der Geotechnik" K-GEO 88, Hamburg, 1988
- [17] N.N. ÖNORM 2076, Entwurf 1. September 1992, Deponien Dichtungsbahnen aus Kunststoff
- [18] KOCH, GAUBE, HESSEL, GONDRO, HEIL
Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen, Müll und Abfall, 8/88
- [19] SEHRBROCK Untersuchungen zur Schutzwirkung von Geotextilien, Fachseminar "Standesicherheiten im Deponiebau, Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen", Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 31, 1990

- [20] HERRMANN Untersuchungen zur Schutzwirkung von Geotextilien auf HDPE-Kunststoffdichtungsbahnen, Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, 1989

- [21] N.N. Protokoll, Workshop "Quo vadis Schutzlagen", 9. und 10. April 1990, (Unter Beteiligung verschiedener Institutionen durchgeführte Workshops)

- [22] SCHNEIDER Bautabellen, Werner-Verlag, 6. Auflage 1984

- [23] PFLÜGER Elementare Schalenstatik, Springer Verlag, 5. Auflage 1981

- [24] BEINHOFF, VÖLKE, PAULI, NICKEL
 Mathematik für Ingenieur- und Fachschulen, Band I+II, 10.Auflage, Fachbuchverlag Leipzig

- [25] BRONSTEIN-SEMENDJAJEW
 Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Zürich

- [26] SCHWARZE Grundlagen der Statistik I + II (4. bzw. 5. Auflage, Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, Herne/Berlin

- [27] LOZAN Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, Verlag Paul Parey, Berlin, 1992

- [28] RAMKE Hydraulische Beurteilung und Dimensionierung der Basisentwässerung von Deponien fester Siedlungsabfälle, Leichtweiss-Institut der TU Braunschweig, Mitteilungen Heft 114, 1991

- [29] MRUK Proceedings of the 9th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, New Orleans, 1985

- [30] N.N. Draft Proposal ISO/DP 9080.2, Plastic Pipes for the Transport of Fluids; Standard Extrapolation Method

- [31] N.N. DIN 53 861, Wölb- und Berstversuch (Prüfung von Geotextilien, Begriffe), August 1970
- [32] N.N. Experimentelle Untersuchungen zum geomechanischen Verhalten von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen, Studiengemeinschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., STUVA, Forschungsberichte 27/91
- [33] KREITER, HUTTEN Ergebnisse von Berstdruckversuchen an Deponiebahnen, MÜLL und ABFALL 8/90
- [34] DUVALL Creep and Stress Rupture Testing of a Polyethylene Geomembrane under Equal Biaxial Tensile Stress, Proc. Geosynthetics '93, Vancouver
- [35] DRESCHER Standsicherheitsnachweise für Deponien, Fachseminar 19./20. März 1990, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 31, 1990
- [36] WITTE Eignungsnachweis polymerer Dichtungsbahnauflagen durch systematische Untersuchungen der Schutzwirkung gegen Drainagekorneindruck, 2. Kongress "Kunststoffe in der Geotechnik", K-GEO 92, Luzern, 1992
- [37] SAATHOFF, PRÖPPING Kunststoff-Dichtungsbahnen mit und ohne Schutzvliesstoffe unter Punktlasten - Teil 1: Grundsätzliches zur Wirkungsweise, Prüfmethode und Versuchseinrichtung des Franzius-Institut, Technischer Bericht des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der universität Hannover, Januar 1988

- [38] SAATHOFF Kunststoffdichtungsbahnen mit und ohne Schutzvliese unter Punktlasten, 5. Fachtagung "Die sichere Deponie", Würzburg, 1989
- [39] N.N. Tagungsband "Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme", 1. Arbeitstagung, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, September 1991

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 * |
| Nr. 10 | Beckmann, U. | Einflußgrößen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen, 1982 |

- Nr. 11 Papakyriakopoulos Verhalten von Erd- und Steinschüttdämmen 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 Früchtenicht, 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 in 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 am 23.-24. Oktober 1985 in Braunschweig, 1985
- Nr. 20 Meseck, H. Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten, Fachseminar am 06.-07. November 1986 in Braunschweig, 1986*
- Nr. 21 Balthaus, H. Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethoden, 1986

- | | | |
|--------|---|---|
| Nr. 22 | Kayser, R.
Meseck, H.
Rösch, A.
Hermanns, R. | Untersuchungen zur Deponierung von Braunkohlen-
aschen, 1986 |
| Nr. 23 | Meseck, H. | Dichtwände und Dichtsohlen, Fachseminar 02.-03. Juni
1987 in Braunschweig, 1987 |
| Nr. 24 | Krause, Th. | Schildvortrieb mit erd- und flüssigkeitsgestützter Orts-
brust, 1987 |
| Nr. 25 | Meseck, H. | Mechanische Eigenschaften mineralischer Dichtwand-
massen, 1987 |
| Nr. 26 | Reuter, E. | Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anor-
ganischen und organischen Säuren, 1988 |
| Nr. 27 | Wichert, H.-W. | Der Einfluß der Alterung auf die Tragfähigkeit histori-
scher 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. | Standssicherheit von Kombinationsabdichtungen auf
Deponieböschungen, 1989 |
| Nr. 30 | Rodatz, W.
u.a. | Sonderheft zum 15jährigen Bestehen des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik, 1989 |
| Nr. 31 | Rodatz, W.
Beckefeld, P.
Shrbrock, U. | Standssicherheiten im Deponiebau / Schadstoffeinbin-
dung durch Verfestigung von Abfällen, Fachseminar am
19.-20. März 1990 in Braunschweig, 1990 |

- | | | |
|--------|--|---|
| Nr. 32 | Knüpfer, J. | Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen, 1990 |
| Nr. 33 | Beckefeld, P. | Schadstoffaustrag aus abgebundenen Reststoffen der Rauchgasreinigung von Kraftwerken - Entwicklung eines Testverfahrens, 1991 |
| Nr. 34 | He, G. | Standsicherheitsberechnungen von Böschungen, 1991 |
| Nr. 35 | Rodatz, W.
Sehrbrock, U. | Probenentnahme bei der Erkundung von 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.
Hemker, O.
Voigt, Th. | Standsicherheiten im Deponiebau, Fachseminar am 30./31. März 1992 in Braunschweig, 1992 |
| Nr. 38 | Rodatz, W.
Meier, K. | Dynamische Pfahltests, Fachseminar am 21.-22. Januar 1991 in Braunschweig, 1991 |
| Nr. 39 | Rösch, A. | Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gelände - Entwicklung von Meßsystemen und Vergleich verschiedener Auswerteverfahren, 1992 |

* = vergriffen

Zentrum für Abfallforschung **ZAF**

Technische Universität Braunschweig

Das Zentrum für Abfallforschung ist im Frühjahr 1986 gegründet worden, um komplexe Fragestellungen der Abfallforschung interdisziplinär bearbeiten zu können. Die Mitglieder des ZAF gehören zu den Bereichen Geowissenschaften, Chemie und Biowissenschaften, Bauingenieurwesen und Maschinenbau bzw. Verfahrenstechnik.

Das ZAF will in erster Linie vorausschauende Forschung betreiben und der öffentlichen Hand, dem Gewerbe und der Industrie bei schwierigen Fragen der Abfallwiederverwendung und -beseitigung sowie der Altlastensanierung beratend beistehen. Aufgrund der fachlichen Kompetenz der Mitglieder des ZAF kann insbesondere an folgenden Fragen beratend, prüfend und z.T. ausführend mitgewirkt werden:



- Konzepte zur Wiederverwendung von Reststoffen
- Planung von Abfalldeponien
- Kontrollmaßnahmen bei Bau und Betrieb von Deponien
- Reinigung von Deponiesickerwässern
- Fassung, Reinigung und Verwendung von Deponiegas
- Untersuchung und Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen
- Erkundung und Gefährdungsabschätzung von Altlasten
- Sanierung von Altlasten

Des weiteren wird neben Fortbildungsveranstaltungen der einzelnen Mitglieder in jedem Jahr im September ein ZAF - Weiterbildungsseminar zu wechselnden Themen veranstaltet.

Zentrum für Abfallforschung
Technische Universität Braunschweig
Postfach 3329
3300 Braunschweig



Fax:

(0531) 391 - 3960

(0531) 391 - 4584

ZAF

Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig

- Heft 1: **Bodensanierung und Grunwasserreinigung
- Wiedernutzung von Altstandorten -**
ZAF-Fachseminar 24./25.09.1986, Braunschweig
- Heft 2: **Möglichkeiten der Überwachung und Kontrolle
von Deponien und Altablagerungen**
Fachseminar 25./25.09.1987, Braunschweig
- Heft 3: **Behandlung von Sickerwässern aus Abfalldeponien**
Fachseminar 13./14.09.1988, Braunschweig
- Heft 4: **Abfallreduzierung und Restmüllentsorgung**
Fachseminar 28./29.09.1989, Braunschweig
- Heft 5: **Erfassung und Bewertung von Altablagerungen**
Fachseminar 27.27.09.1990, Braunschweig
- Heft 6: **Aufbereitung fester Siedlungsabfälle vor der
Deponierung**
Fachseminar 26./27.09.1991, Braunschweig
- Heft 7: **Ist die thermische Behandlung von Abfallstoffen
vermeidbar ?**
Fachseminar 24./25.09.1992, Braunschweig