

STUVA e.V.
Studiengesellschaft für unterirdische
Verkehrsanlagen e.V.

UNIVERSITÄT HANNOVER
Institut für Baustoffkunde und
Materialprüfung

**Erweiterte Untersuchungen zum Nachweis
der Schutzwirksamkeit von Schutzschichten
für Kunststoffdichtungen im Tunnelbau**

FE 89.081/2000/B3

Schlussbericht

Oktober 2001

Erweiterte Untersuchungen zum Nachweis der Schutzwirksamkeit von Schutzschichten für Kunststoffdichtungen im Tunnelbau

Forschungsauftrag FE 89.081/2000/B3
der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),
Bergisch Gladbach
an die
Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.
- STUVA -, Köln

Bearbeitung der Berichtskapitel
1, 2, 4 bis 8 (außer 5.2) durch
die STUVA / STUVAtec GmbH, Köln
Prof. Dr.-Ing. Alfred Haack
Dr.-Ing. Jörg Schreyer
Dipl.-Ing. Sylvia Beyer
und Bearbeitung der Berichtskapitel
3 und 5.2 durch
das Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung
unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus,
Universität Hannover
Dr.-Ing. Katrin Brummermann

Schlussbericht
Oktober 2001

Finanzielle Unterstützung durch
die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Essen

Kurzfassung

Tunnel, die in Spritzbetonweise hergestellt werden, können z.B. mit Hilfe von Kunststoffdichtungsbahnen gegen eindringendes Wasser abgedichtet werden. Die Kunststoffdichtungsbahn und deren geotextile Schutzschicht werden während der Tunnelbauphase und der Betriebsphase durch Einzelasten und Flächendruck beansprucht.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden solche Beanspruchungen in verschiedenen Versuchsreihen simuliert. Dazu wurden am Institut für Baustoffkunde der Universität Hannover Indexversuche mit Einzellasten (Durchdrück- und Zeitstandversuche) und bei der STUVA, Köln anwendungstechnische Versuche mit Flächendruckbeanspruchung sowie Berstdruckversuche durchgeführt.

Die wichtigsten Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Auf eine geotextile Schutzschicht darf keinesfalls verzichtet werden, da sonst die Kunststoffdichtungsbahn zu starke Eindrückungen erhält oder sogar perforiert wird.
- b) Der Feuchtigkeitsgehalt einer geotextilen Schutzschicht aus Endlosfaservliesstoff hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Tiefe der Eindrückungen in die Kunststoffdichtungsbahn.
- c) Für die geotextile Schutzschicht sollte eine Mindestgeotextilmasse mit einem Mittelwert minus Standardabweichung von ≥ 900 und $< 1.200 \text{ g/m}^2$ gewählt werden.
- d) Dränmatten bieten einen gewissen Schutz, sollten jedoch mit einem luftseitigen Schutzvlies (Robustheitsgrad 4) versehen werden.
- e) Beschädigungen der Kunststoffdichtungsbahn durch Vorbelastung im Flächendruckversuch haben im Kurzzeit-Berstdruckversuch nur einen geringen Einfluss auf das mehrachsige Dehnungsverhalten.

Die neuen Forschungsergebnisse sollten bei der Neufassung der ZTV-ING Berücksichtigung finden. Es wird empfohlen, Zeitstanddruckversuche als „Indextests“ und Flächendruckversuche im Brunnenkopf als „Anwendungstechnische Versuche“ in die Regelwerke aufzunehmen.

Inhalt

1	Einleitung und Aufgabenstellung	7	4.1.1	Ziel der Versuche und Versuchsprogramm	40
2	Prüfmaterialien.....	8	4.1.2	Versuchsbeschreibung und Versuchsprogramm	41
2.1	Allgemeines	8	4.1.3	Versuchsergebnisse der Flächendruckversuche	43
2.2	Kunststoffdichtungsbahnen	8	4.1.4	Zusammenfassung der Flächendruckversuche	46
2.3	Geotextilien	8	4.2	Berstdruckversuche.....	46
2.4	Dränmatten	9	4.2.1	Ziel der Versuche	46
3	Untersuchungen im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover	15	4.2.2	Versuchsbeschreibung.....	47
3.1	Untersuchungsziele und -programm	15	4.2.3	Versuchsprogramm	48
3.2	Versuche zur Materialidentifikation der Kunststoffdichtungsbahnen	15	4.2.4	Bestimmung der mittleren mehrachsigen Dehnungen	48
3.2.1	Bestimmung der Schmelze- Massefließraten (MFR).....	15	4.2.5	Bestimmung von Einzeldehnungen.....	49
3.2.2	DSC-Analysen	15	4.2.6	Versuchsergebnisse der Berstdruckversuche.....	50
3.3	Festigkeitsuntersuchungen an Geotextilien	16	4.2.7	Zusammenfassung der Berstdruckversuche.....	54
3.3.1	Allgemeines	16	5	Tunnelbautechnische Bewertung.....	54
3.3.2	Zugversuche	16	5.1	Allgemeines	54
3.3.3	Stempeldurchdrückversuche	24	5.2	Tunnelbautechnische Bewertung aufgrund der Indexversuche.....	55
3.4	Schutzwirksamkeitsuntersuchungen an Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen	27	5.3	Tunnelbautechnische Bewertung aufgrund der Flächendruckversuche.....	55
3.4.1	Versuchsbeschreibungen	27	6	Aufnahme der Versuche in die Regelwerke.....	56
3.4.2	Versuchsergebnisse	31	7	Ausblick.....	57
3.5	Auswertungen mit Berücksichtigung der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 89.029/1997/B3.....	36	8	Literatur	58
4	Flächendruck- und Berstdruckversuche der STUVA	40	9	Fotodokumentation.....	59
4.1	Flächendruckversuche im Brunnentopf	40			

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Für die kommenden Jahre wird der Bau zahlreicher Tunnel prognostiziert [1]. Ein Großteil dieser Tunnel wird in geschlossener Bauweise mit der Spritzbetonmethode erstellt. Im Hinblick auf die Gebrauchsfähigkeit dieser Tunnel über eine erwartete Lebensdauer von 100 Jahren und mehr kommt es entscheidend auf geeignete Maßnahmen zum Schutz der unterirdischen Verkehrswege gegen eindringende Feuchtigkeit und Leckagen an. Hierfür stehen je nach angewandtem Bauverfahren wasserundurchlässiger Beton (WU-Beton) ergänzt durch elastomere Dichtungsprofile oder Fugenbänder sowie vor allem Hautabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen zur Verfügung.

Die Hautabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn und deren geotextile Schutzschicht werden während der Tunnelbauphase und der Betriebsphase durch Einzellasten und Flächendruck beansprucht. Die Schutzwirksamkeit von Geotextilien ist daher nachzuweisen.

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben FE 89.029/1997/B3 "Untersuchung der Schutzwirksamkeit von Geotextilien bei Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen" [2] wurde die Schutzwirksamkeit von unterschiedlichen Geotextilien zwar unter Einzellasten und Flächendruckbelastung untersucht, jedoch konnten nicht alle offenen Fragestellungen geklärt werden. Im jetzigen Forschungsvorhaben sollten daher folgende Punkte untersucht werden:

- a) Einfluss der Durchfeuchtung von Geotextilien auf die Schutzwirksamkeit,
- b) Einfluss der Gewebeart bei unterschiedlichen Verbundstoffen auf die Schutzwirksamkeit,
- c) Mögliche Schutzwirksamkeit von Dränmatten,
- d) Grad der Beschädigung von Kunststoffdichtungsbahnen bei fehlender Schutzschicht,
- e) Einfluss von Beschädigungen der Kunststoffdichtungsbahnen auf das mehrachsige Dehnungsverhalten.

Die oben genannten Punkte sollten durch folgende Versuche geklärt werden:

- (1) Universität Hannover

Um neue Erkenntnisse über die Prüfmethodik und den Vergleich unterschiedlicher Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen zu gewinnen, wurden vom Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover weggesteuerte Durchdrückversuche sowie kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung durchgeführt (Kapitel 3). Ferner wurden von einigen Geotextilien Materialdaten, wie flächenbezogene Masse, Dicke und das Zug-Dehnverhalten bestimmt, um genauere Kenntnisse über die verwendeten Materialien zu erhalten. Zur besseren Identifikation der PE-Dichtungsbahnen wurden die Schmelz-Massefließraten (MFR) bestimmt und DSC-Analysen durchgeführt.

- (2) STUVA

Bei der STUVA in Köln wurde in Kurzzeitversuchen mit Flächendruckbelastung (Brunnentopf) bei unterschiedlichen Abdichtungsaufbauten die Wirksamkeit von verschiedenen Schutzschichten untersucht. Ferner wurde von im Flächendruckversuch vorbelasteten Kunststoffdichtungsbahnen die maximale mehrachsige Dehnung im Berstdruckversuch bestimmt und mit entsprechenden Berstdruckversuchsergebnissen von unbelasteten Bahnen verglichen.

Die durch die Versuche gewonnenen Erkenntnisse sollen bei der Überarbeitung der Vorschriften des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) für Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau (ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 5) und ebenfalls in den diesbezüglichen Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) Berücksichtigung finden.

Zur Zeit werden in der ZTV-ING alle technischen und vertraglichen Regelwerke des Brücken- und Ingenieurbaus zusammengefasst, in die auch die ZTV-Tunnel integriert wird. Die ZTV-Tunnel gliedert sich zukünftig unter der Bezeichnung ZTV-ING, Teil 5 in fünf Abschnitte:

- Abschnitt 1: Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise)
- Abschnitt 2: Offene Bauweise

- Abschnitt 3: Geschlossene Bauweise (Maschinelle Vortriebsverfahren)
- Abschnitt 4: Betriebstechnische Ausstattung
- Abschnitt 5: Abdichtung von Straßentunneln mit Kunststoffdichtungsbahnen

Die Abdichtung mit Kunststoffdichtungsbahnen und damit auch die geotextilen Schutzschichten bekommen in dem Regelwerk als eigenständiger neuer Abschnitt der ZTV-Tunnel mit zugehörigen Technischen Lieferbedingungen (TL) und Technischen Prüfvorschriften (TP) ein größeres Gewicht.

Auch die „Empfehlungen Doppeldichtung – EDT“ der DGGT werden durch eine Untergruppe des Arbeitskreises 5.1 „Kunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau“ umfassend überarbeitet. Die Empfehlungen werden sich nicht mehr nur auf doppel-lagige Kunststoffdichtungen beschränken, sondern ebenfalls umlaufende einlagige Kunststoffdichtungen und Regenschirmabdichtungen behandeln. Anders als in den Zusätzlichen Technischen Vertragsvorschriften des BMVBW werden die Empfehlungen mehr Erläuterungen enthalten. Die Herausgabe der Empfehlungen wird für das Jahr 2002 angestrebt.

2 Prüfmateriale

2.1 Allgemeines

Die Materialauswahl für die Versuche erfolgte durch die STUVA und die Universität Hannover in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der DGGT. Es wurden zwei Kunststoffdichtungsbahntypen, zwei verschiedene Verbundstoffe, zwei unterschiedliche Vliesstoffe sowie zwei Dränmatten ausgewählt. Zur besseren Identifikation der Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen wurden spezielle Untersuchungen erforderlich, da die von den Herstellern gelieferten Angaben häufig zu ungenau waren. Beispielsweise wurden von den Herstellern nur Mindestwerte zu den Materialien angegeben, die in den entsprechenden Vorschriften gefordert werden. Diese Identifikationsuntersuchungen wurden sowohl an Materialien des Forschungsvorhabens "Untersuchung der Schutzwirksamkeit von Geotextilien bei Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen, FE 89.029/1997/B3" [2] als auch an „neuen“

Materialien durchgeführt. Die Identifikation der Materialien des vorangegangenen Vorhabens war erforderlich, um die jetzigen Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen von [2], insbesondere bei den Wiederholungsversuchen, vergleichen zu können, da Materialien unterschiedlicher Chargen eingesetzt wurden.

2.2 Kunststoffdichtungsbahnen

Zur Benennung der unterschiedlichen Kunststoffdichtungsbahnen wurden dreiteilige Probenbezeichnungen nach folgendem Prinzip verwendet:

- KDB + Nr. (KDB = Kunststoffdichtungsbahn; lfd. Nr. als Kurzbezeichnung für den Hersteller),
- Abkürzung für den Rohstoff (PE oder PVC) und
- Bahndicke in mm (2 mm oder 3mm).

Da der Einfluss der Schutzwirksamkeit von geotextilen Schutzschichten bzw. Dränmatten auf die Kunststoffdichtungsbahn untersucht werden sollte, durfte der Parameter "Kunststoffdichtungsbahn" nur wenig variiert werden. Für die Versuche wurden daher nur eine PE-Bahn (Kurzbezeichnung: KDB2-PE-3) und eine PVC-Bahn (Kurzbezeichnung: KDB3-PVC-3) ausgewählt (Tabelle 2.1). Die Nennstärke der verwendeten Kunststoffdichtungsbahnen betrug einheitlich 3 mm. Derartige Bahnen werden in der Regel für die Abdichtung von Tunnelbauwerken gegen drückendes Wasser eingesetzt (Tabelle 2.1).

Ferner wurden Untersuchungen zur Identifikation (z.B. Schmelzindex, Reißdehnung, Reißfestigkeit) der oben genannten Kunststoffdichtungsbahnen und von weiteren Bahnen aus dem Vorhaben [2] durchgeführt. Diese Identifikationsuntersuchungen wurden teilweise von der Universität Hannover und zum anderen Teil vom Süddeutschen Kunststoffzentrum (SKZ) vorgenommen (Tabelle 2.1).

2.3 Geotextilien

In den Versuchsreihen wurden ein Stapelfaser- und ein Endlofaservlies, ein Verbundstoff mit Multifilamentgewebe sowie einer mit Bändchengewebe untersucht (Tabelle 2.2). Da die Mindestgeotextilmasse in der neuen ZTV-Tunnel voraussichtlich mit einem Mittelwert minus Standardabweichung von ≥ 900 und < 1.200 g/m² angegeben wird, sollten die in den Versuchen einge-

setzten Geotextilien generell eine Nennmasse von 1.000 g/m² besitzen.

In den Durchdrück-, Zeitstanddruck-, und Zeitstandversuchen wurden beispielsweise Abdichtungspakete bestehend aus Geotextil und Kunststoffdichtungsbahn untersucht und mit den Ergebnissen von [2] verglichen. Ferner wurden zur Identifikation der Geotextilmaterialien die Kenndaten wie Masse, Dicke und Zugfestigkeit der hier und in [2] geprüften Geotextilien bestimmt.

Zur Benennung der unterschiedlichen Geotextilien wurde folgende vierstellige Probenbezeichnung verwendet:

- GT + Nr. (GT = Geotextil, lfd. Nr. als Kurzbezeichnung für den Hersteller),
- Abkürzung für die Geotextil- bzw. Faserart (S = Stapelfaservliesstoff, E = Endlosfaservliesstoff, G = Monofilamentgewebe (Bild 2.1), MG = Multifilamentgewebe (Bild 2.2), BG = Bändchengewebe (Bild 2.3)),
- Abkürzung für den Rohstoff des Vliesstoffes (PP) und
- Geotextilnennmasse in g/m².

2.4 Dränmatten

Zur Ableitung des Gebirgswassers werden im Tunnelbau teilweise spezielle Dränmatten eingesetzt, die in der Regel keine Schutzschichtfunktion besitzen. In den Brunnentopf-Versuchen sollte geprüft werden, ob Dränmatten auch über eine gewisse Schutzwirkung verfügen. Es wurde eine Dränmatte mit Noppen (Bild 2.4) sowie eine mit Vlies kaschierte Dränmatte mit Wirtgelege (Bild 2.5) untersucht (Tabelle 2.3).

Die Probenbezeichnung der beiden Dränmatten erfolgt nach folgendem Schema:

- DM + Nr. (DM = Dränmatte; lfd. Nr. als Kurzbezeichnung für den Hersteller) und
- Abkürzung für den Rohstoff der Dränmatte (PEHD oder PP).

Typ	Prüfmethode	KDB1-PE-2	KDB1-PE-3	KDB2-PE-2	KDB2-PE-3	KDB3-PVC-2	KDB3-PVC-3
Lieferdatum		1998	1998	1998	2000	1998	2000
Material		PE	PE	PE	PE	PVC	PVC
Nennstärke ohne Signalschicht [mm]		2	3	2	3	2	3
Dicke, Mittelwert [mm]	DIN 16 726	keine Angabe	3,22 ¹⁾	keine Angabe	3,30 ¹⁾	2,03 ¹⁾	3,17 ¹⁾
Flächengewicht [g/m ²]			3111 ¹⁾		3203 ¹⁾	2669 ¹⁾	4332 ¹⁾
Dichte [g/m ³]	DIN 53 479		0,97 ¹⁾		0,97 ¹⁾	1,31 ¹⁾	1,37 ¹⁾
Äußere Beschaffenheit	DIN 16 726	fehlerfrei	fehlerfrei	fehlerfrei	fehlerfrei	fehlerfrei	fehlerfrei
Gradheit (g) und Planlage (p) [mm]	DIN 16 726	g = 50 p = 10	g = 50 p = 10	g = 50 p = 50	g = 50 p = 50	g = 20 p = 10	g = 20 p = 6
Maßänderung nach Warmlagerung längs/quer [%]	DIN 16 726	<1,5 / <1,5	<1,5 / <1,5	<1 / <1	-0,33 / 0,18	-1,44 / 0,51	>-2 / < 2
Schmelze-Massefließrate, 190/5 [g/ 10 min]	DIN ISO 1133	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	2,97	für PVC nicht relevant	für PVC nicht relevant
Zugfestigkeit, längs/quer [N/mm ²]	DIN 53455	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	32 / 34	keine Angabe	17,1/ 14,3
Reißfestigkeit, längs/quer [N/mm ²]	DIN 16 726	10	14,6 / 14,2 ^{1) 2)}	31 / 31	27,5 / 30,2 ^{1) 2)}	19,1 / 17,5	16,4 / 14,6 ^{1) 2)}
Reißdehnung, längs/quer [%]	DIN 16 726	600	710 / 814 ^{1) 2)}	1043 / 1116	840 / 882 ^{1) 2)} 1047 / 1171	297 / 299 ^{1) 2)} 335 / 351	326 / 328 ^{1) 2)}
Falzen bei -20°C [-]	DIN 16 726	keine Risse	keine Risse	ohne Bruch	ohne Bruch	keine Risse	keine Risse

¹⁾ Werte vom Süddeutschen Kunststoffzentrum (SKZ) ermittelt

²⁾ Prüfung bei PE nach DIN EN ISO 527-3, Prüfung bei PVC-P nach DIN 16 726

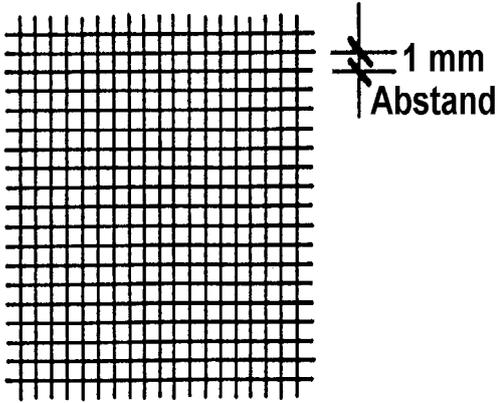
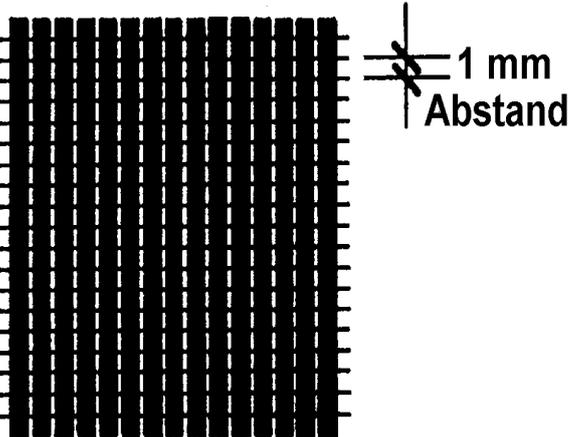
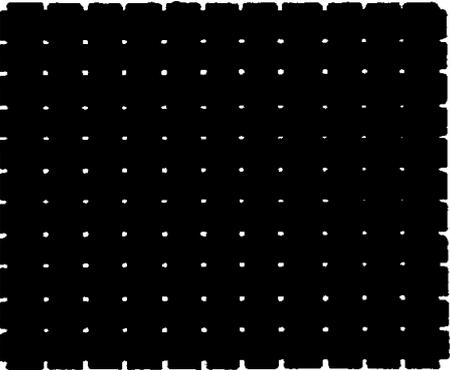
Tab. 2.1: Materialkenndaten der verwendeten Kunststoffdichtungsbahnen (Herstellerangaben, falls nicht gesondert gekennzeichnet)

Typ	Prüfmethode	GT1-S-PP-500	GT1-S-PP-800	GT1-S-PP-1000	GT1-S-PP-1200	GT1-S+G-PP-700	GT1-S+G-PP-1000	GT1-S+G-PP-1200	GT1-S+MG-PP-1000
Lieferdatum		1998	7/ 2000	1998	1998	1998	1998	1998	7/ 2000
Produktbeschreibung		Mechanisch verfestigter Stapelfaservliesstoff				Verbundstoff: Mechanisch verfestigter Stapelfaservliesstoff + Monofilamentgewebe , vernadelt			Verbundstoff: Mechanisch verfestigter Stapelfaservliesstoff + Multifilamentgewebe , vernadelt
Roh-/ Werkstoff		PP	PP	PP	PP	Vlies: PP Gewebe: PE			Vlies: PP Gewebe: PE / PP
Dicke bei 2 kPa [mm]	DIN EN 964-1	4,8	5	6	8	4,8	5,5	6	5
Masse [g/m ²]	ISO 965	500	800	1000	1200	Gewebe : ca. 200 Vlies : ca. 500	Gewebe: ca. 200 Vlies: ca. 800	Gewebe: ca. 200 Vlies: ca. 1000	Gewebe: ca. 200 Vlies: ca. 800
Filteröffnungsweite O ₉₀ [mm]	DIN EN ISO 12 956	keine Angaben	0,08	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	Gewebe: 0,06 -0,15 Vlies: 0,08
Höchstzugkraft [kN/m] längs / quer	ISO 10 319	25 / 35	30 / 45	30 / 60	35 / 70	Gewebe: 30 / 30 Vlies: 25 / 25	Gewebe: 30 / 30 Vlies: 28 / 55	Gewebe: 30 / 30 Vlies: 25 / 35	Gewebe: 30 / 30 Vlies: 30 / 45
Höchstzugkraftdehnung [%] längs / quer	ISO 10 319	60 / 55	80 / 60	80 / 45	100 / 50	Gewebe: 25 / 25 Vlies: 60 / 55	Gewebe: 25 / 25 Vlies: 60 / 50	Gewebe: 25 / 25 Vlies: 60 / 55	Gewebe: 30 / 30 Vlies: 80 / 60
Stempeldurchdrückkraft [kN]	DIN EN ISO 12 236	5	6	8	11	5	8	9	8

Tab. 2.2a: Materialkenndaten der verwendeten Vlies- und Verbundstoffe (Herstellerangaben), Teil 1

Typ	Prüf- methode	GT2-E-PP-500	GT2-E-PP-800	GT2-E-PP-1000	GT2-E-PP-1200	GT3-S-PP-800	GT3-S+BG-PP-1000
Lieferdatum		1998	1998	1998	1998	2000	2000
Produktbeschreibung		Mechanisch verfestigter Endlosfaservliesstoff				Mechanisch verfestigter Stapelfaservliesstoff	Verbundstoff: Mechanisch verfestigter Stapelfaservliesstoff + Bändchengewebe , vernadelt
Roh-/ Werkstoff		PP	PP	PP	PP	PP	Gewebe: PE Vlies: PP
Dicke [mm]	DIN EN 964-1	4	5,3	7,2	8,3	7,3	7
Masse [g/m ²]	ISO 965	500	800	1000	1200	800	Gewebe: ca. 220 Vlies: ca. 800
Filteröffnungsweite O ₉₀ [mm]	DIN EN ISO 12 956	0,06	0,05	0,05	0,04	keine Angaben	keine Angaben
Höchstzugkraft [kN/m] längs / quer	ISO 10 319	30 / 30	42 / 42	48 / 48	52 / 52	38 / 70	Gewebe: 32 / 36 Vlies: 37 / 65
Höchstzugkraftdehnung [%] längs / quer	ISO 10 319	95 / 90	95 / 90	95 / 90	95 / 90	100 / 60	Gewebe: 20 / 20 Vlies: 100 / 60
Stempeldurchdrückkraft [kN]	DIN EN ISO 12 236	4,7	7,2	8,5	9,8	8,5	10,0

Tab. 2.2b: Materialkenndaten der verwendeten Vlies- und Verbundstoffe (Herstellerangaben), Teil 2

Nr.	Draufsicht auf Gewebe	Gewebebeschreibung
1	 <p>Bild 2.1: Monofilamentgewebe</p>	<p>Monofilamentgewebe</p> <p>Kette und Schuss: Monofilamentgarn aus PE (Garndicke ca. 0,15 mm)</p>
2 ^{*)}	 <p>Bild 2.2: Multifilamentgewebe</p>	<p>Multifilamentgewebe</p> <p>Kette: Monofilamentgarn aus PE (Garndicke ca. 0,15 mm)</p> <p>Schuss: Multifilamentgarn aus PP (Garndicke ca. 1 mm)</p>
3 ^{*)}	 <p>Bild 2.3: Bändchengewebe</p>	<p>Bändchengewebe</p> <p>Kette und Schuss: Bändchengarn aus PEHD, Bändchenbreite ca. 1 bis 2 mm</p>

^{*)} Zwischen dem Multifilamentgarn bzw. dem Bändchengarn wurden zur besseren Erkennbarkeit Zwischenräume dargestellt

Typ	DM1-PEHD	DM2-PP
Produktbeschreibung	Dränmatte: Noppenbahn	Dränmatte: Vlies + zickzackförmige Monofilamente (Wirrgelege)
Roh-/ Werkstoff	PEHD	Vlies: PP Drängewebe: PP
Dicke [mm]	Noppenhöhe: 8,0 Trägerbahn: 0,6	Vlies: 2,3 Drängewebe: ca. 5
Höchstzugkraft [kN/m] längs/ quer	---	Vlies: 14 Drängewebe: entfällt
Höchstzugkraftdehnung längs/ quer [%]	---	Vlies: 50 Drängewebe: entfällt
Stempeldurchdrückkraft (x-s) [kN]	---	Vlies: 2,0 Drängewebe: entfällt
Druckfestigkeit [kN/m ²]	250	keine Angaben
Dränkapazität [l/ (s m)]	2,25 (bei ca. 17 kPa)	1,67 (bei ca. 20 kPa)

Tab. 2.3: Materialkenndaten der verwendeten Dränmatten (Herstellerangaben)

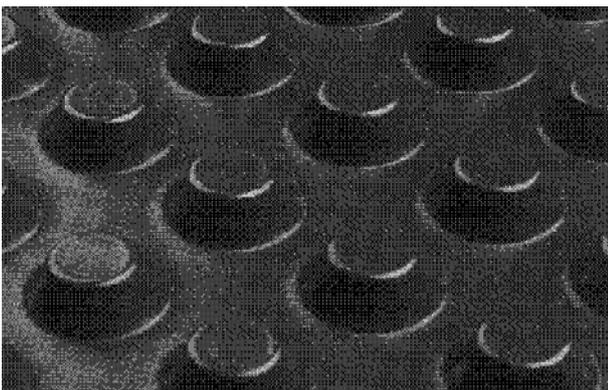
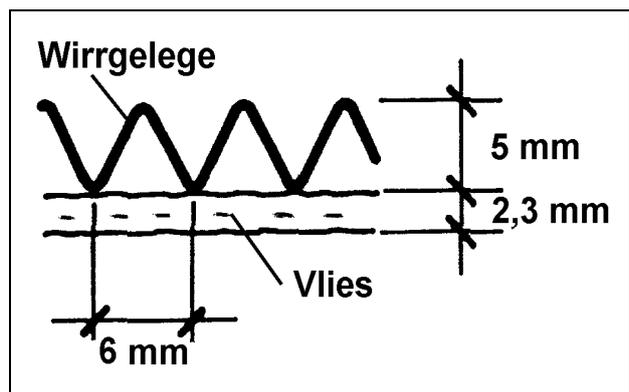


Bild 2.4: Dränmatte aus PEHD mit Noppen



Wirrgelege: zickzackförmig angeordnete Monofilamente aus PP

Vlies aus PP: Nennmasse: 200 g/ m², mit Wirrgelege alle 20 cm vernäht

Bild 2.5: Dränmatte aus zickzackförmigem Wirrgelege mit Vlieskaschierung (Seitenansicht)

3 Untersuchungen im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover

3.1 Untersuchungsziele und -programm

Die Untersuchungen im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung sollen weitere Erkenntnisse für die Festlegung der Materialanforderungen an geotextile Schutzschichten und die Vorgabe eines einfachen Indextestes zur Prüfung ihrer Wirksamkeit in den Regelwerken des BMVBW und der DGGT bringen. Zu diesem Zweck wurden die bereits im Vorhaben FE 89.029/1997/B3 im Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energie-wasserbau (IGBE) begonnenen Untersuchungen fortgesetzt.

Zur Untersuchung der Schutzwirksamkeit wurden an ausgewählten Kunststoffdichtungsbahnen, Geotextilien und Dränmatten Indexversuche mit Pyramidendruckstempel durchgeführt, nämlich:

- Durchdrückversuche,
- Zeitstanddruckversuche und
- Zeitstandsversuche mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung.

Um die verwendeten Prüfmaterialien genauer beschreiben zu können wurden Schmelze-Massefließraten der PE-Kunststoffdichtungsbahnen bestimmt, DSC-Analysen an diesen Bahnen vorgenommen und weiterhin Zug- und Stempeldurchdrückversuche an den Geotextilien durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse des vorausgegangenen Forschungsvorhabens FE 89.029/1997/B3 ausgewertet und zusammengefaßt.

3.2 Versuche zur Materialidentifikation der Kunststoffdichtungsbahnen

3.2.1 Bestimmung der Schmelze-Massefließraten (MFR)

Es wurden die Schmelze-Massefließraten (MFR) der PE-Dichtungsbahnen KDB1 und KDB2 für eine Prüftemperatur von 190 °C und eine Nominallast von 5 kg nach DIN EN ISO 1133 : 2000-02 bestimmt [3]. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.1 zusammengestellt.

Unter Berücksichtigung der üblichen Streubreiten sind die deutlich unter 10 % liegenden Unterschiede zwischen den Bahnen mit gleicher Produktbezeichnung aus unterschiedlichen Herstellungschargen, also zwischen Nr. 1 und Nr. 2 bzw. zwischen Nr. 3 und Nr. 4, nicht signifikant.

3.2.2 DSC-Analysen

Es wurden DSC-Analysen an den PE-Dichtungsbahnen KDB1 und KDB2 durchgeführt. Bei den Proben der Kunststoffdichtungsbahn KDB2 wurden die weiße und die schwarze Schicht getrennt analysiert. Der Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 180 °C wurde zweimal durchlaufen. Die Heizrate betrug 10 K/min. In Bild 3.1 sind die benötigten Wärmeleistungen des zweiten Durchlaufs abhängig von der Prüftemperatur aufgetragen. Die Dichtungsbahnen KDB1 und KDB2 weisen unterschiedliche Kurvenverläufe und -peaks auf. Die Kurvenverläufe und -peaks der schwarzen und der weißen Schicht der Dichtungsbahn KDB2 unterscheiden sich hingegen ebenso wie die Kurvenverläufe und -peaks der Dichtungsbahnen gleichen Typs aus unterschiedlichen Herstellungschargen untereinander nicht signifikant.

Nr.	Probenbezeichnung	Mittlere Schmelze-Massefließrate (190,5) in g/10 min
1	KDB1 PE - 1. Lieferung für FE 89.029/1997/B3	7,771
2	KDB1 PE - 2. Lieferung für FE 89.029/1997/B3	7,637
3	KDB2 PE - Lieferung für FE 89.029/1997/B3	3,854
4	KDB2 PE - Lieferung für FE 89.081/2000/B3	3,688

Tab. 3.1: Schmelze-Massefließraten (MFR) der untersuchten PE-Dichtungsbahnen

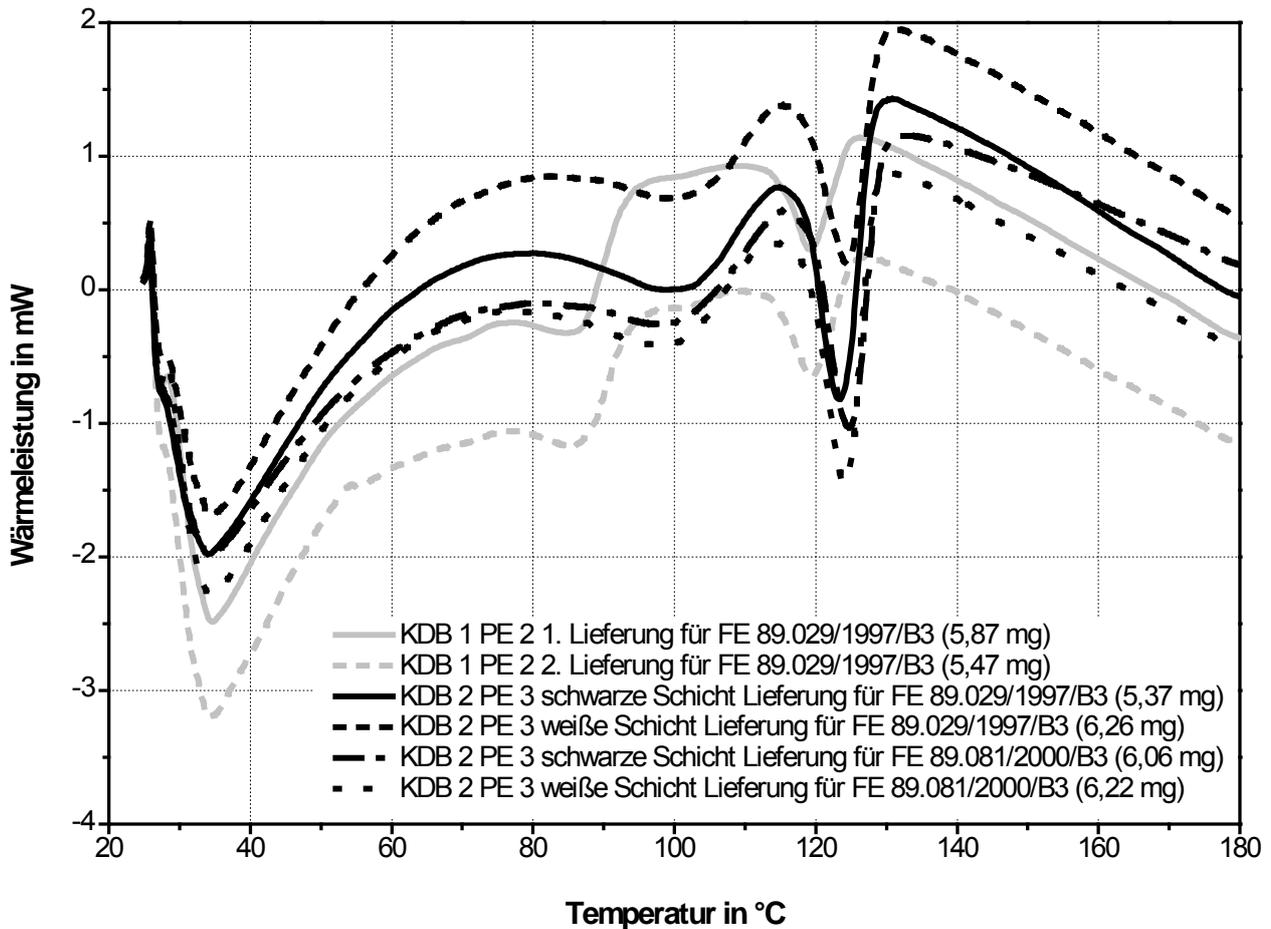


Bild 3.1: Wärmeleistung abhängig von der Probentemperatur für die Dichtungsbahnproben KDB1 PE und KDB2 PE jeweils aus zwei Herstellungschargen

3.3 Festigkeitsuntersuchungen an Geotextilien

3.3.1 Allgemeines

Es wurden Zug- und Stempeldurchdrückversuche an elf bereits im Forschungsvorhaben FE 89.029/1997/B3 in Schutzwirkamkeitsnachweisen getesteten Geotextilien und an drei in diesem Forschungsvorhaben FE 89.081/2000/B3 zusätzlich untersuchten Geotextilien durchgeführt. Ergänzend wurden die flächenbezogenen Massen der Proben der Zug- und Stempeldurchdrückversuche, die Dicken unter einer Auflast von 2 kPa und für fast alle Geotextilien auch unter einer Auflast von 20 kPa nach DIN EN 964-1 bestimmt. Die ermittelten Massen und Dicken sind in Tab. 3.2 aufgeführt.

3.3.2 Zugversuche

Es wurden Zugversuche am breiten Streifen nach DIN EN ISO 10319 : 1996-06 durchgeführt [4]. Dazu wurden jeweils fünf trockene Proben in Produktionsrichtung und fünf trockene Proben quer zur Produktionsrichtung im Normalklima 20/65 geprüft. Die Probenbreite betrug 200 mm und die freie Klemmlänge 100 mm. Die Dehnungsrate betrug 20 mm/min. Es ergaben sich die in Tab. 3.3 zusammengestellten Höchstzugkräfte und Höchstzugkraftdehnungen und die für Dehnungen von 2, 5, 10 und 15 % ermittelten Sekantensteifheiten. Die Sekantensteifheit bei einer vorgegebenen Dehnung ist der Quotient aus der auf die Probenbreite bezogenen Zugkraft und der Dehnung. Es sind jeweils die Mittelwerte, die Standardabweichungen, die Differenzen aus Mittelwerten und Standardabweichungen sowie die Variationskoeffi-

zienten angegeben. Bei Verbundstoffen aus Gewebe und Vliesstoff ergeben sich zwei Maxima der Zugkraft-Dehnungslinie. Das erste Maximum wird auch als Gewebe- und das zweite als Vliesstoff-peak bezeichnet.

Nr.	Prüfmaterial	Masse in g/m ²		mittlere Dicke in mm		
		x*	s	unter 2 kPa Auflast	unter 20 kPa Auflast	
1	FE 89.029/1997/B3	GT1 S PP 500	522	28	4,9	4,1
2		GT1 S PP 800	833	37	6,2	-
3		GT1 S PP 1000	1085	24	6,7	5,6
4		GT1 S PP 1200	1263	47	9,8	8,5
5		GT1 S+G PP 700	737	16	5,9	-
6		GT1 S+G PP 1000	1025	10	5,8	5,0
7		GT1 S+G PP 1200	1277	22	6,3	5,5
8		GT2 E PP 500	515	15	3,6	3,1
9		GT2 E PP 800	816	18	5,9	-
10		GT2 E PP 1000	1071	32	6,5	5,5
11		GT2 E PP 1200	1363	30	8,5	7,4
12	FE 89.081/2000/B3	GT1 S+MG PP 1000	1053	10	6,4	6,1
13		GT3 S PP 800	878	35	7,3	6,8
14		GT3 S+BG PP 1000	1072	30	8,4	7,9
X*: Mittelwert						
S: Standardabweichung						

Tab. 3.2: Massen und Dicken der untersuchten Geotextilien

Nr.	Prüfmaterial			1. Zugkraft- maximum in KN/m	Dehnung am 1. Maximum in %	2. Zugkraft- maximum in KN/m	Dehnung am 2. Maximum in %	Sekantensteifheit in kN/m bei Deh- nung von			
								2 %	5 %	10 %	15 %
1	GT1 S PP 500	längs	x*	25,5	64,5	-	-	24,9	20,0	18,6	19,2
			s	1,2	1,7	-	-	1,0	0,9	0,8	0,7
			x* - s	24,3	62,8	-	-	23,9	19,0	17,8	18,5
			v	4,6	2,7	-	-	4,0	4,7	4,5	3,4
		quer	x*	39,6	56,1	-	-	36,6	27,7	26,8	29,2
			s	3,0	0,9	-	-	3,1	2,4	2,4	2,7
			x* - s	36,5	55,2	-	-	33,5	25,3	24,4	26,5
			v	7,6	1,6	-	-	8,3	8,6	9,1	9,4
2	GT1 S PP 800	längs	x*	33,1	69,1	-	-	39,0	32,7	30,6	30,4
			s	0,9	0,7	-	-	1,8	1,4	1,2	1,1
			x* - s	32,2	68,4	-	-	37,2	31,3	29,5	29,3
			v	2,8	1,1	-	-	4,6	4,3	3,8	3,5
		quer	x*	68,0	42,8	-	-	98,9	93,4	100,1	111,8
			s	5,9	2,0	-	-	4,7	5,9	6,0	5,3
			x* - s	62,0	40,8	-	-	94,1	87,5	94,1	106,5
			v	8,7	4,6	-	-	4,8	6,3	6,0	4,7
3	GT1 S PP 1000	längs	x*	29,3	88,6	-	-	38,3	33,4	32,7	31,8
			s	0,8	2,9	-	-	0,8	0,8	0,6	0,5
			x* - s	28,6	85,7	-	-	37,4	32,6	32,1	31,2
			v	2,6	3,2	-	-	2,2	2,4	1,8	1,7
		quer	x*	85,1	51,2	-	-	132,7	135,5	135,6	145,4
			s	2,1	0,2	-	-	6,0	18,3	4,6	4,7
			x* - s	83,0	51,0	-	-	126,7	117,1	131,0	140,7
			v	2,5	0,4	-	-	4,5	13,5	3,4	3,2
4	GT1 S PP 1200	längs	x*	33,6	126,8	-	-	26,1	16,8	13,7	12,7
			s	1,3	5,2	-	-	0,8	0,6	0,5	0,4
			x* - s	32,3	121,6	-	-	25,3	16,2	13,3	12,3
			v	3,8	4,1	-	-	3,1	3,3	3,4	3,5
		quer	x*	102,0	54,8	-	-	106,5	85,8	86,3	96,4
			s	6,5	1,8	-	-	8,9	8,6	9,3	10,5
			x* - s	95,5	53,1	-	-	97,5	77,2	77,0	85,9
			v	6,3	3,2	-	-	8,4	10,0	10,8	10,9
5	GT1 S+G PP 700	längs	x*	31,1	28,0	16,0	98,7	118,4	87,4	93,2	102,4
			s	0,3	0,6	0,8	3,2	3,0	2,4	1,9	1,5
			x* - s	30,9	27,4	15,2	95,5	115,3	85,0	91,3	100,9
			v	0,9	2,1	5,3	3,2	2,6	2,8	2,1	1,4
		quer	x*	36,4	20,8	52,0	57,2	186,9	169,3	167,8	178,1
			s	0,9	0,4	2,0	3,1	2,3	1,6	1,3	1,5
			x* - s	35,5	20,4	50,0	54,1	184,6	167,7	166,6	176,6
			v	2,4	1,8	3,9	5,4	1,2	0,9	0,8	0,8

Tab. 3.3a: Ergebnisse der Zugversuche

Nr.	Prüfmaterial			1. Zugkraft- maximum in KN/m	Dehnung am 1. Maximum in %	2. Zugkraft- maximum in KN/m	Dehnung am 2. Maximum in %	Sekantensteifheit in kN/m bei Dehnung von			
								2 %	5 %	10 %	15 %
6	GT1 S+G PP 1000	längs	x*	32,8	22,9	26,6	104,0	135,2	112,7	122,2	135,1
			s	1,0	0,5	0,7	3,1	3,9	2,6	2,4	2,3
			x* - s	31,8	22,4	25,8	100,8	131,4	110,1	119,8	132,8
			v	3,1	2,2	2,8	3,0	2,9	2,3	2,0	1,7
		quer	x*	46,8	19,0	73,7	49,5	229,9	231,9	245,3	261,6
			s	2,2	1,1	1,4	1,6	20,1	12,2	7,7	5,9
			x* - s	44,6	17,9	72,3	47,9	209,9	219,7	237,6	255,7
v	4,7	5,8	1,9	3,2	8,7	5,3	3,1	2,2			
7	GT1 S+G PP 1200	längs	x*	38,6	24,6	35,5	93,9	128,2	108,9	123,0	140,1
			s	0,8	0,5	1,7	2,9	3,3	2,4	2,2	1,5
			x* - s	37,8	24,1	33,8	91,0	124,9	106,5	120,8	138,6
			v	2,0	2,0	4,8	3,1	2,6	2,2	1,8	1,1
		quer	x*	57,7	18,8	91,6	50,2	252,3	274,4	293,9	311,1
			s	1,3	0,4	0,9	1,8	27,1	18,4	14,4	10,8
			x* - s	56,5	18,4	90,7	48,4	225,2	256,0	279,5	300,3
v	2,2	2,3	1,0	3,7	10,7	6,7	4,9	3,5			
8	GT2 E PP 500	längs	x*	32,3	86,4	-	-	95,6	80,2	66,9	60,6
			s	2,3	7,5	-	-	9,4	8,5	7,0	6,2
			x* - s	29,9	78,9	-	-	86,2	71,7	59,9	54,4
			v	7,2	8,6	-	-	9,9	10,5	10,5	10,2
		quer	x*	34,1	73,1	-	-	115,2	98,2	82,4	75,4
			s	0,9	2,0	-	-	6,9	4,5	3,5	3,1
			x* - s	33,2	71,1	-	-	108,3	93,7	78,9	72,2
v	2,6	2,7	-	-	6,0	4,6	4,3	4,1			
9	GT2 E PP 800	längs	x*	48,7	98,4	-	-	155,5	133,9	109,7	97,1
			s	1,6	8,0	-	-	7,9	5,5	4,4	3,8
			x* - s	47,1	90,4	-	-	147,6	128,4	105,3	93,3
			v	3,4	8,1	-	-	5,1	4,1	4,0	3,9
		quer	x*	50,2	79,5	-	-	214,2	174,3	135,9	119,2
			s	1,6	1,7	-	-	5,1	4,9	4,2	3,7
			x* - s	48,6	77,9	-	-	209,1	169,4	131,7	115,5
v	3,2	2,1	-	-	2,4	2,8	3,1	3,1			
10	GT2 E PP 1000	längs	x*	41,7	86,8	-	-	128,2	116,8	97,0	85,8
			s	4,4	3,9	-	-	9,9	9,4	8,4	7,7
			x* - s	37,2	82,8	-	-	118,2	107,4	88,6	78,0
			v	10,6	4,5	-	-	7,8	8,1	8,6	9,0
		quer	x*	49,7	68,7	-	-	217,8	184,8	146,0	127,5
			s	4,3	4,4	-	-	15,0	9,9	8,0	7,3
			x* - s	45,4	64,3	-	-	202,8	175,0	137,9	120,1
v	8,7	6,4	-	-	6,9	5,3	5,5	5,8			

Tab. 3.3b: Ergebnisse der Zugversuche

Nr.	Prüfmaterial			1. Zugkraft-	Dehnung am	2. Zugkraft-	Dehnung am	Sekantensteifheit in kN/m bei Dehnung von			
				maximum	1. Maximum	maximum	2. Maximum	2 %	5 %	10 %	15 %
				in KN/m	in %	in KN/m	in %				
11	GT2 E PP 1200	längs	x*	56,0	85,8	-	-	156,3	151,5	133,9	120,7
			s	1,3	3,4	-	-	8,8	8,9	6,1	4,3
			x* - s	54,7	82,4	-	-	147,4	142,6	127,8	116,4
			v	2,4	4,0	-	-	5,7	5,9	4,6	3,6
		quer	x*	53,2	92,7	-	-	98,3	106,8	106,8	99,8
			s	1,6	5,3	-	-	2,4	3,0	3,1	3,1
			x* - s	51,6	87,4	-	-	95,9	103,8	103,8	96,7
			v	3,0	5,7	-	-	2,5	2,8	2,9	3,1
12	GT1 S+MG PP 1000	längs	x*	37,1	31,0	27,2	108,6	120,5	124,7	122,4	122,4
			s	0,7	0,8	0,9	1,8	4,7	3,5	1,2	0,7
			x* - s	36,4	30,2	26,2	106,8	115,7	121,2	121,1	121,7
			v	2,0	2,5	3,5	1,7	3,9	2,8	1,0	0,6
		quer	x*	69,0	24,3	87,5	65,8	132,8	166,6	243,5	282,7
			s	1,9	0,8	2,8	2,0	3,4	5,6	7,0	6,8
			x* - s	67,1	23,5	84,7	63,8	129,4	161,0	236,5	275,8
			v	2,8	3,2	3,1	3,1	2,6	3,4	2,9	2,4
13	GT3 S PP 800	längs	x*	40,6	92,1	-	-	32,9	22,4	19,8	19,5
			s	2,0	2,6	-	-	3,0	3,0	3,3	3,4
			x* - s	38,6	89,5	-	-	29,9	19,4	16,5	16,1
			v	4,9	2,8	-	-	9,2	13,6	16,6	17,5
		quer	x*	89,9	54,1	-	-	100,8	87,9	97,3	113,2
			s	5,1	1,9	-	-	9,7	9,5	10,9	12,4
			x* - s	84,8	52,2	-	-	91,1	78,3	86,4	100,8
			v	5,6	3,5	-	-	9,6	10,9	11,2	10,9
14	GT3 S+BG PP 1000	längs	x*	33,0	25,1	40,2	102,8	70,0	91,9	113,4	126,1
			s	0,6	0,8	3,8	1,6	3,6	4,0	5,4	6,4
			x* - s	32,4	24,3	36,3	101,1	66,5	87,9	108,0	119,7
			v	1,8	3,2	9,6	1,6	5,1	4,3	4,8	5,1
		quer	x*	41,4	20,6	80,4	62,4	194,3	172,1	171,5	191,9
			s	1,6	0,2	2,0	2,3	5,8	5,6	7,4	9,0
			x* - s	39,8	20,3	78,4	60,1	188,5	166,5	164,2	182,9
			v	3,9	1,1	2,5	3,7	3,0	3,3	4,3	4,7
x*: Mittelwert s: Standardabweichung v: Variationskoeffizient in %											

Tab. 3.3c: Ergebnisse der Zugversuche

In den Bildern 3.2 bis 3.5 sind exemplarisch Zugkraft-Dehnungslinien von einer der jeweils fünf untersuchten Geotextilproben dargestellt. In Bild 3.6, 3.7 und 3.8 sind die mittleren Höchstzugkräfte am 1. Maximum der Zugkraft-Dehnungslinie, sowie die Sekantensteifigkeiten bei 2 % und bei 15 % Dehnung abhängig von der mittleren Masse dargestellt. Die Zugkraft-Dehnungslinien sowie die Höchstzugkräfte und die Höchstzugkraftdehnun-

gen in und quer zur Produktionsrichtung unterscheiden sich zum Teil erheblich. Die Bilder 3.6 bis 3.8 zeigen keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den Höchstzugkräften und den Sekantensteifigkeiten bei vorgegebenen Dehnungen und den Massen der Geotextilien. Es sind auch keine eindeutigen Unterschiede zwischen Vliesstoffen und Verbundstoffen aus Vliesstoff und Gewebe erkennen.

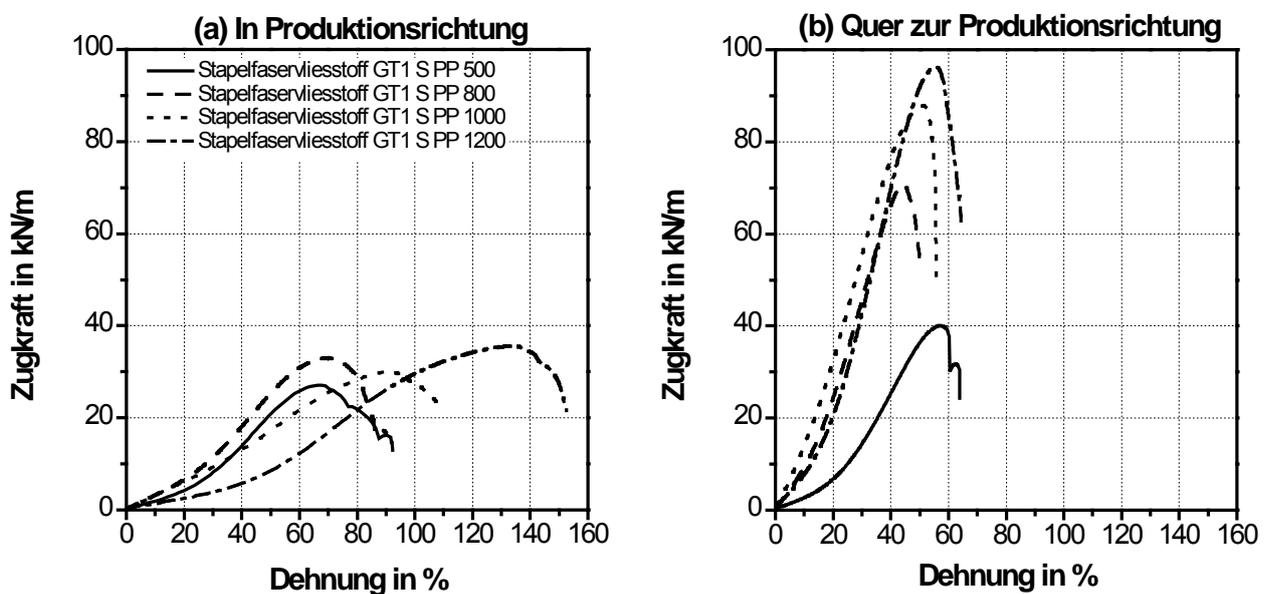


Bild 3.2: Zugkraft-Dehnungslinien der Stapelfaservliesstoffe GT1 S PP x mit variierten Massen

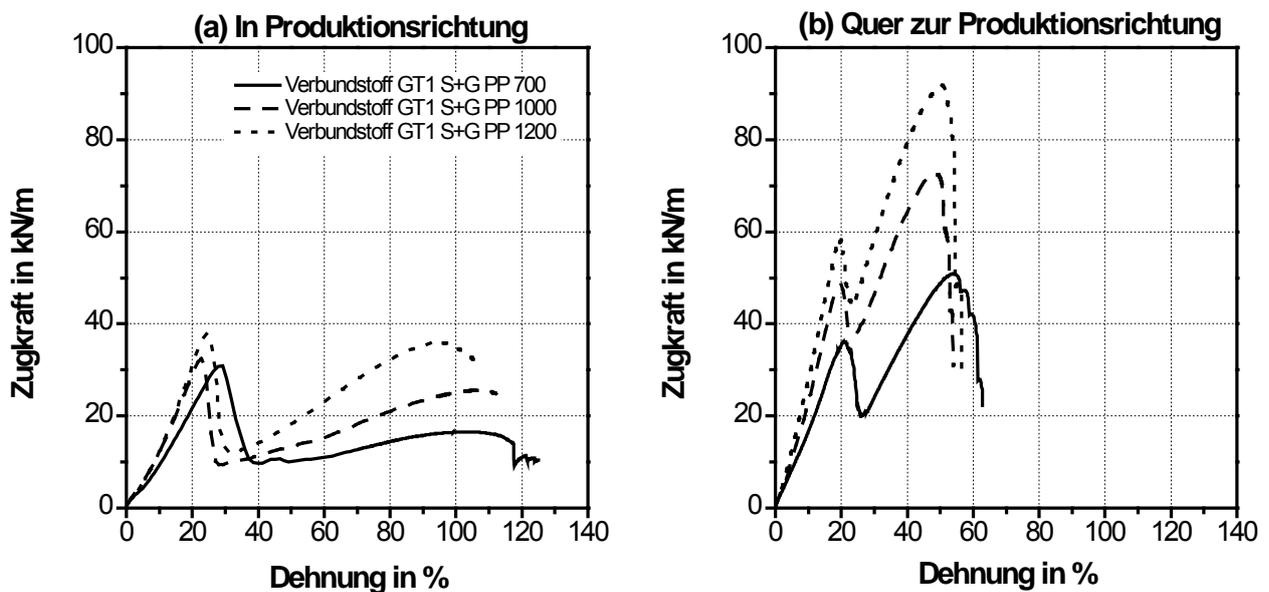


Bild 3.3: Zugkraft-Dehnungslinien der Verbundstoffe aus Stapelfaservliesstoff und Monofilamentgewebe GT1 S+G PP x mit variierten Massen

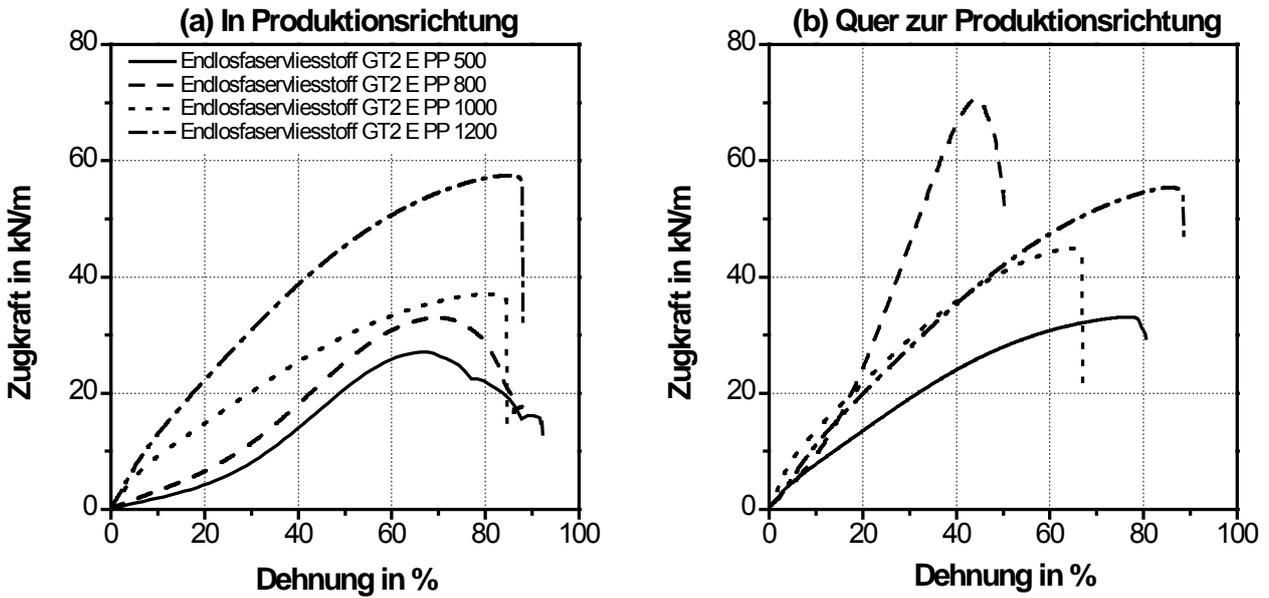


Bild 3.4: Zugkraft-Dehnungslinien der Endlosefaservliesstoffe GT2 E PP x mit variierten Massen

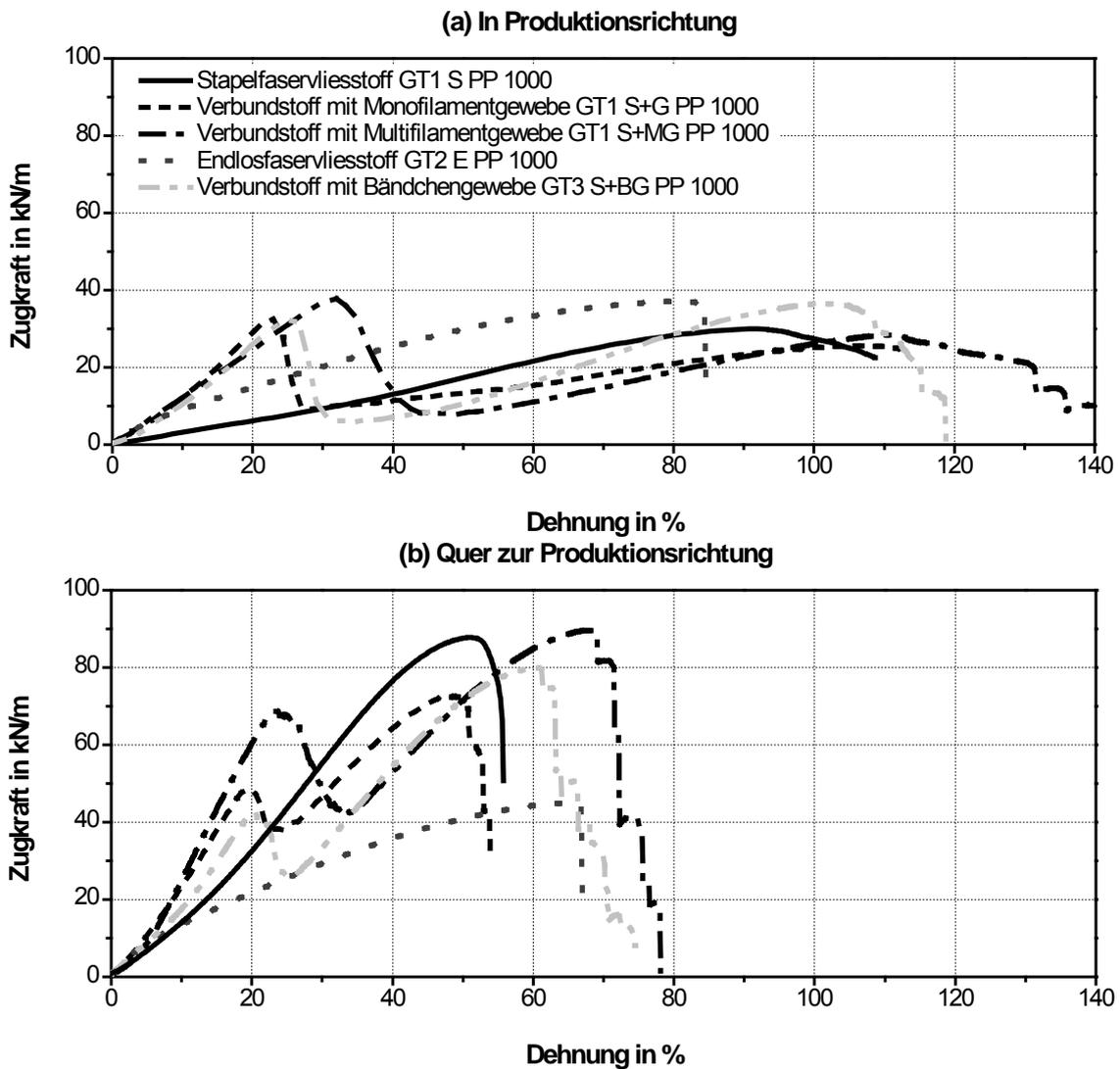


Bild 3.5: Zugkraft-Dehnungslinien unterschiedlicher Geotextiltypen bei annähernd gleicher Masse

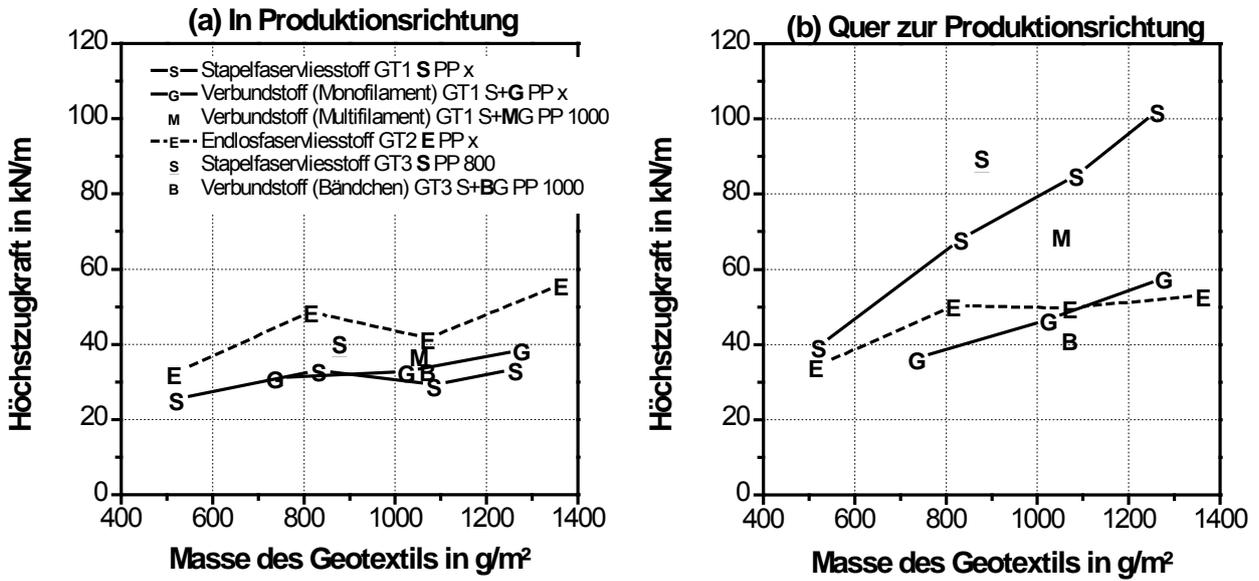


Bild 3.6: Mittlere Höchstzugkraft am 1. Maximum der Zugkraft-Dehnungslinie abhängig von der Masse

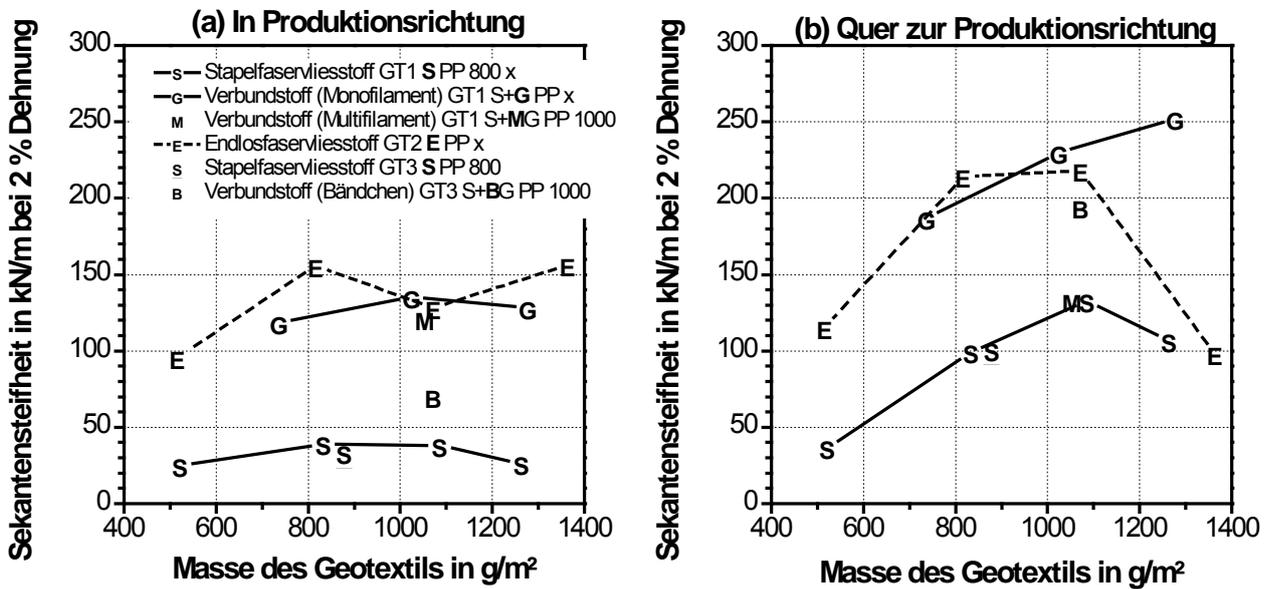


Bild 3.7: Mittlere Sekantensteifheit bei 2 % Dehnung abhängig von der Masse

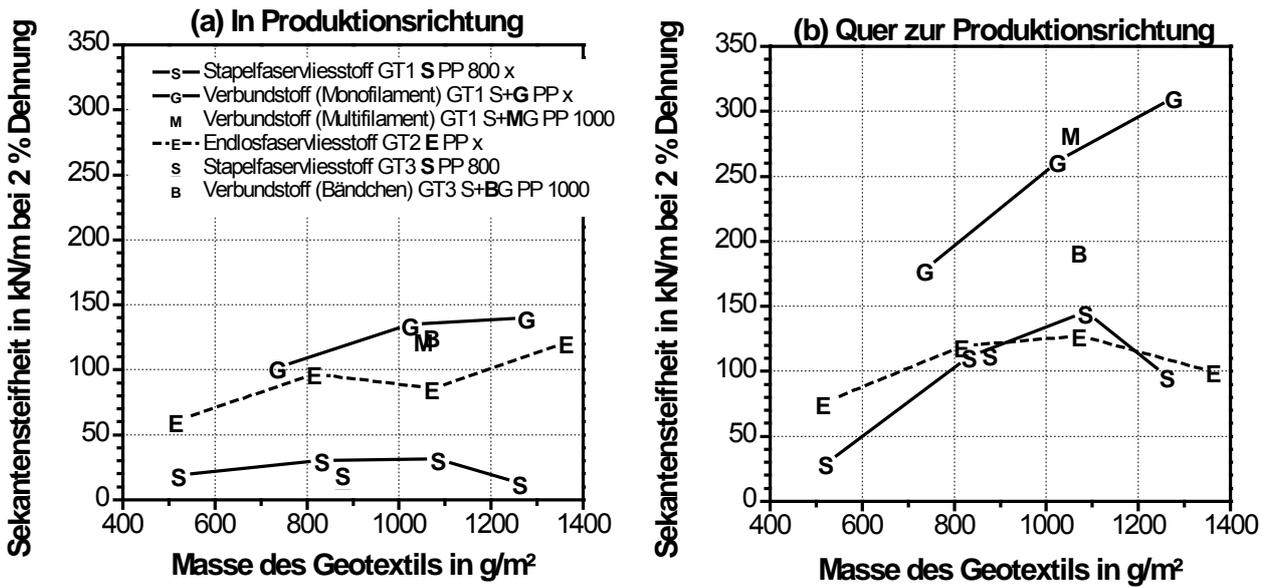


Bild 3.8: Mittlere Sekantensteifheit bei 15 % Dehnung abhängig von der Masse

3.3.3 Stempeldurchdrückversuche

Es wurden Stempeldurchdrückversuche (CBR-Versuche) nach DIN EN ISO 12236 : 1996-04 durchgeführt [5]. Es wurden jeweils zehn trockene Proben im Normalklima 20/65 getestet. Die kreisförmigen Proben wurden in eine hydraulische Klemmvorrichtung mit einem inneren Ringdurchmesser von 150 mm eingespannt. Der zylindrische Druckstempel hat einen Durchmesser von 50 mm und wurde mit 50 mm/min vorgeschoben. Die Stempeldurchdrückkräfte und die zugehörigen Stempelvorschübe sind in Tab. 3.4 zusammengestellt. Es sind jeweils die Mittelwerte, die Standardabweichungen, die Differenzen aus Mittelwerten und Standardabweichungen sowie die Variationskoeffizienten angegeben. Ebenso wie bei den Zugversuchen ergeben sich bei Verbundstoffen

aus Vliesstoff und Gewebe in der Regel zwei Maxima in der Stempelkraft-Vorschub-Linie.

In den Bildern 3.9 bis 3.12 sind exemplarisch Eindrückkraft-Vorschub-Linien von einer der jeweils zehn untersuchten Geotextilproben dargestellt. In Bild 3.13 sind die mittleren Stempeldurchdrückkräfte am 1. Maximum der Eindrückkraft-Vorschub-Linie abhängig von der Masse dargestellt. Mit zunehmender Masse des Geotextils nehmen die Stempeldurchdrückkräfte zu. Die Eindrückkraft-Vorschub-Linien verlaufen im Anfangsbereich allerdings mit zunehmender Geotextilmasse nicht notwendigerweise steiler. Wie bei den Zugversuchen zeigen sich auch bei den Stempeldurchdrückversuchen für Vliesstoffe und Verbundstoffe keine eindeutigen Unterschiede im Anfangsbereich der Eindrückkraft-Vorschublinien und in der Größe der Stempeldurchdrückkräfte.

Nr.	Prüfmaterial		1. Maximum der Stempelkraft in kN bzw. %	Vorschub am 1. Maximum in mm bzw. %	2. Maximum der Stempelkraft in kN bzw. %	Vorschub am 2. Maximum in mm bzw. %
1	GT1 S PP 500	x*	5,766	58	-	-
		s	0,405	2	-	-
		x* - s	5,361	56	-	-
		v	7,0	4,0	-	-
2	GT1 S PP 800	x*	9,519	58	-	-
		s	0,906	1	-	-
		x* - s	8,613	57	-	-
		v	9,5	1,5	-	-
3	GT1 S PP 1000	x*	10,421	58	-	-
		s	0,281	1	-	-
		x* - s	10,140	58	-	-
		v	2,7	1,0	-	-
4	GT1 S PP 1200	x*	12,029	69	-	-
		s	0,456	2	-	-
		x* - s	11,573	67	-	-
		v	3,8	2,2	-	-
5	GT1 S+G PP 700	x*	4,987	42	6,054	64
		s	0,302	1	0,247	2
		x* - s	4,685	41	5,807	62
		v	6,1	1,9	4,1	2,5
6	GT1 S+G PP 1000	x*	6,204	41	8,161	59
		s	0,221	1	0,160	0
		x* - s	5,983	39	8,001	58
		v	3,6	3	2,0	1
7	GT1 S+G PP 1200	x*	8,486	41	10,824	55
		s	0,329	2	0,320	1
		x* - s	8,157	39	10,504	54
		v	3,9	5	3,0	2
8	GT2 E PP 500	x*	5,946	59	-	-
		s	0,353	1	-	-
		x* - s	5,593	57	-	-
		v	5,9	3	-	-
9	GT2 E PP 800	x*	8,792	64	-	-
		s	0,385	2	-	-
		x* - s	8,407	62	-	-
		v	4,4	3	-	-
10	G E PP 1000	x*	9,845	61	-	-
		s	0,516	1	-	-
		x* - s	9,330	60	-	-
		v	5,2	2	-	-
11	GT2 E PP 1200	x*	10,862	69	-	-
		s	0,620	2	-	-
		x* - s	10,241	68	-	-
		v	5,7	2	-	-
12	GT1 S+MG PP 1000	x*	11,318	58	10,165	72
		s	0,851	2	0,374	2
		x* - s	10,467	56	9,792	70
		v	7,5	3	3,7	3
13	GT3 S PP 800	x*	10,230	60	-	-
		s	0,390	1	-	-
		x* - s	9,840	59	-	-
		v	3,8	1	-	-
14	GT3 S+BG PP+PE 1000	x*	9,570	52	-	-
		s	0,868	2	-	-
		x* - s	8,701	50	-	-
		v	9,1	5	-	-

Tab. 3.4: Ergebnisse der Stempeldurchdrückversuche

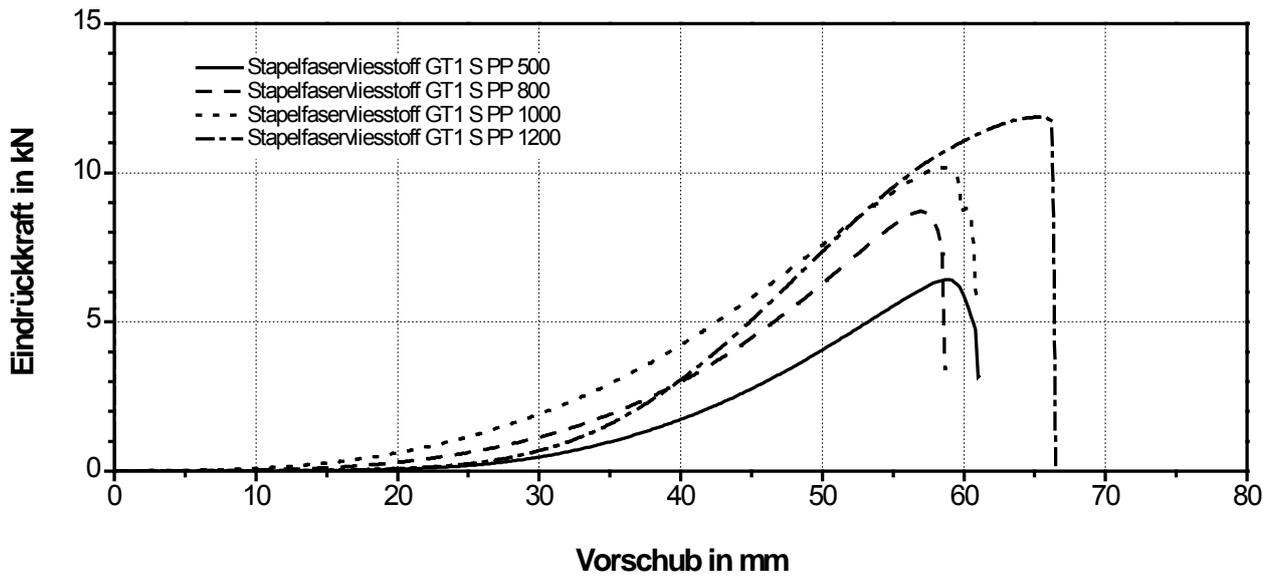


Bild 3.9: Eindrückkraft-Vorschub-Linien der Stapelfaservliesstoffe GT1 S PP x mit variierten Massen

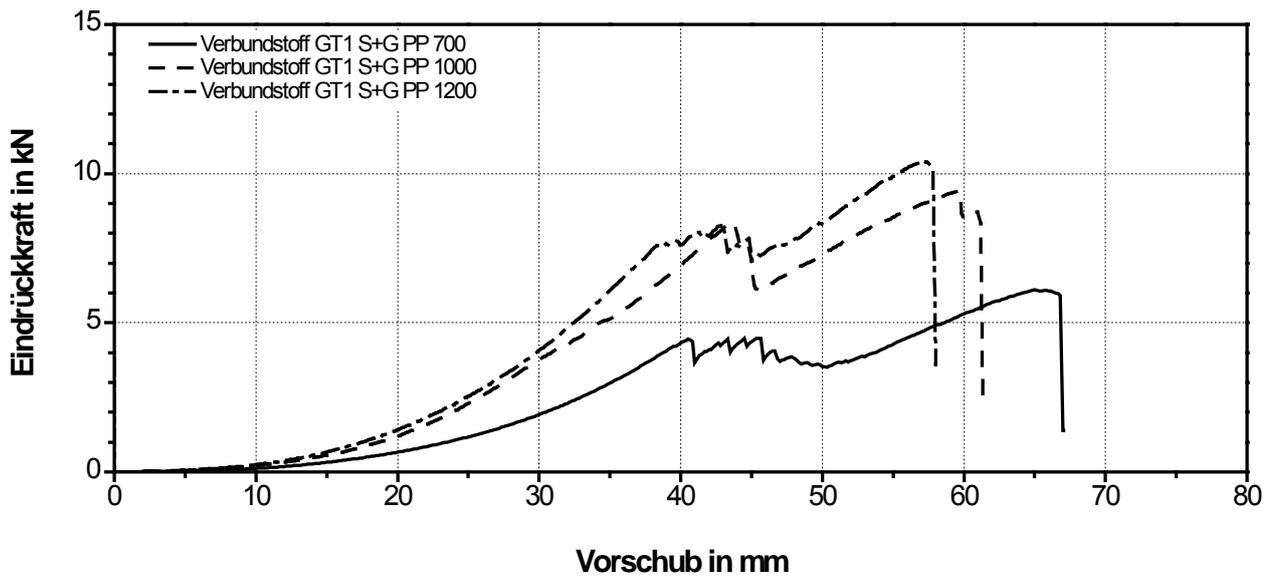


Bild 3.10: Eindrückkraft-Vorschub-Linien der Verbundstoffe aus Stapelfaservliesstoff und Monofilamentgewebe GT1 S+G PP x mit variierten Massen

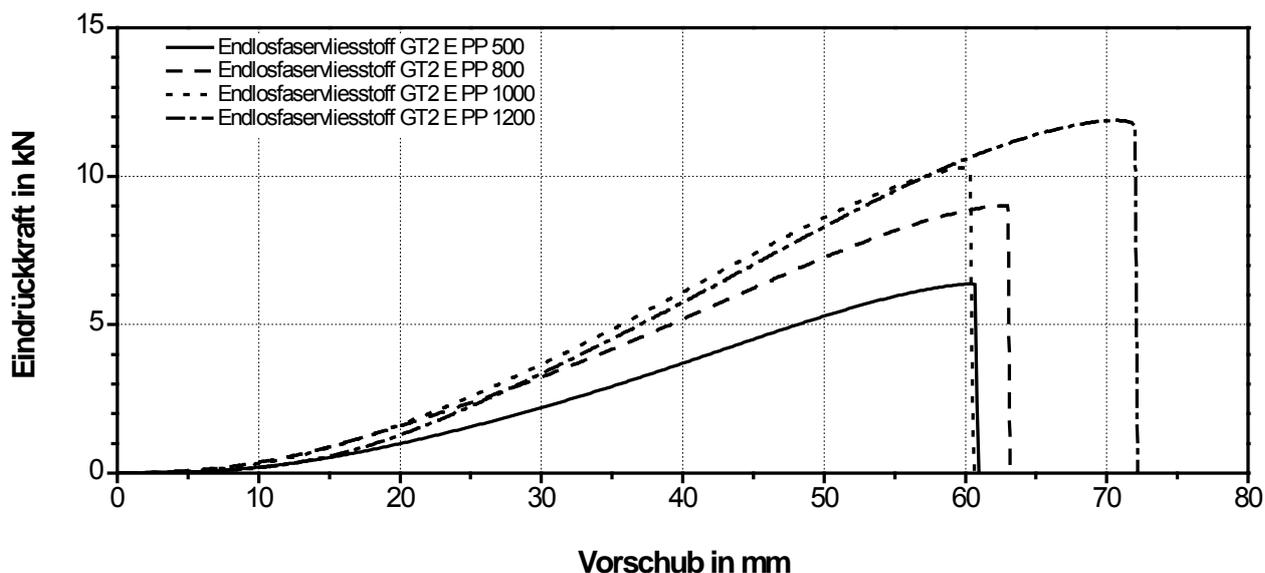


Bild 3.11: Eindrückkraft-Vorschub-Linien der Endlofaservliesstoffe GT2 E PP x mit variierten Massen

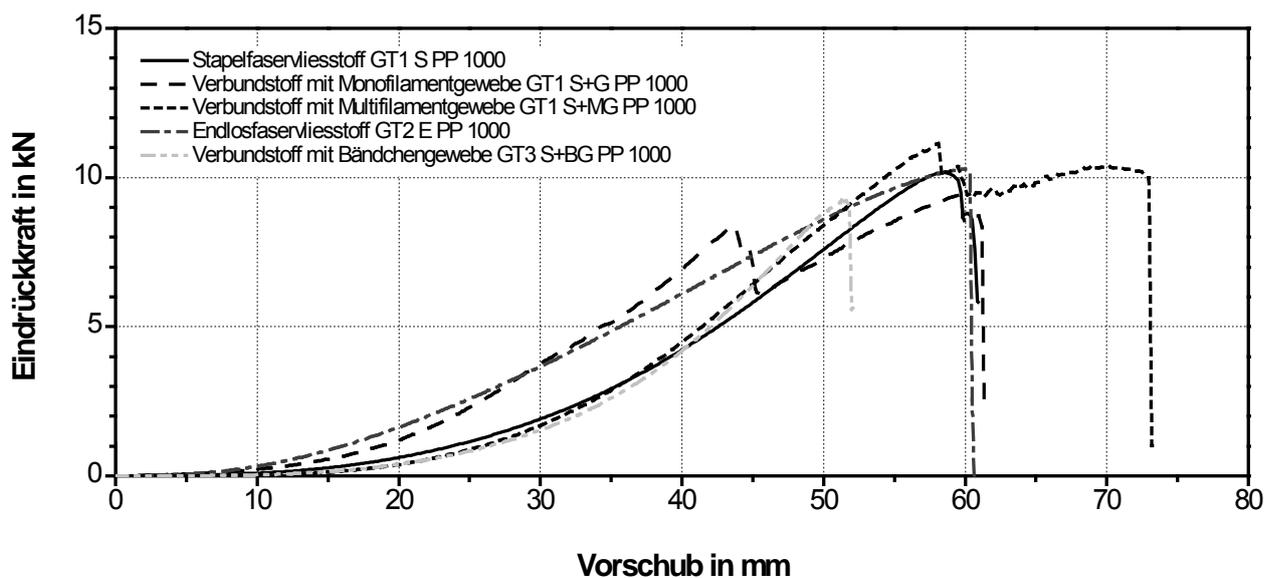


Bild 3.12: Eindrückkraft-Vorschub-Linien unterschiedlicher Geotextiltypen bei annähernd gleicher Masse

3.4 Schutzwirksamkeitsuntersuchungen an Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen

3.4.1 Versuchsbeschreibungen

Es wurden folgende, in Bild 3.14 und 3.15 skizzierte Versuchsvarianten durchgeführt:

- weggesteuerte Durchdrückversuche,
- kraftgesteuerte Zeitstanddruckversuche und

- Zeitstandversuche mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung.

Bei allen Versuchen wurden vor Versuchsbeginn die flächenbezogene Masse und die Anfangsdicke - für Geotextilien gemäß DIN EN 964-1 unter einer Last von 2 kPa - der Proben ermittelt.

- Weggesteuerte Durchdrückversuche

Die weggesteuerten Durchdrückversuche wurden in Anlehnung an ÖNORM S 2076, 1973

[10], bzw. ASTM D 5494, 1993, an Dichtungs-

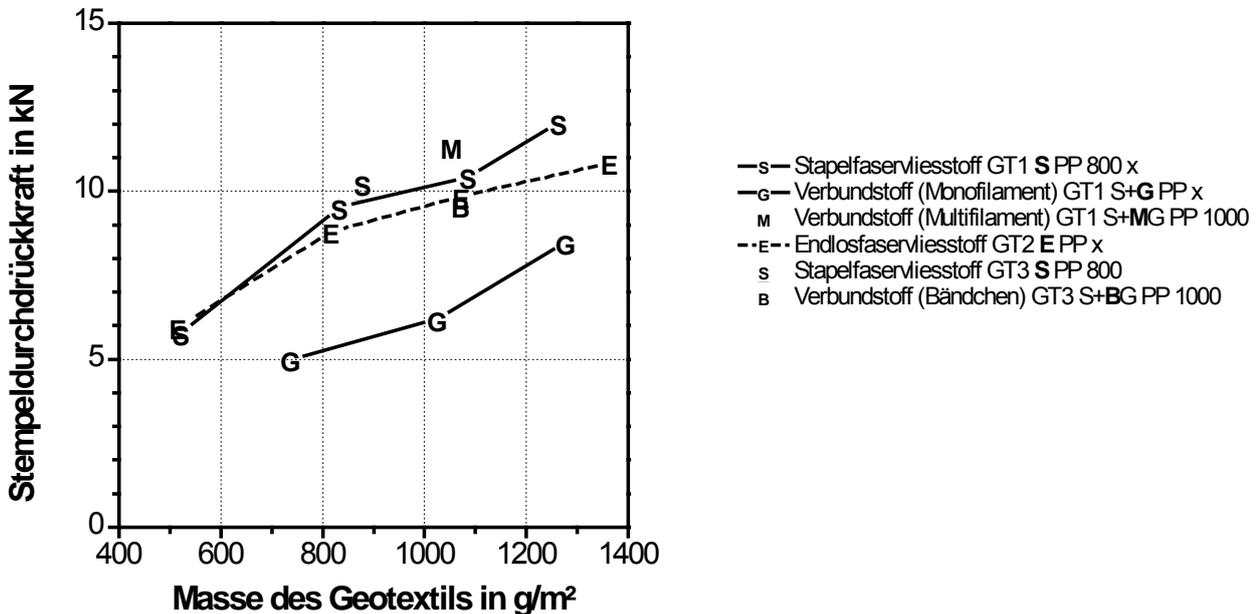


Bild 3.13: Mittlere Stempeldurchdrückkraft am 1. Maximum der Stempelkraft-Vorschub-Linie abhängig von der Masse

bahnen, Geotextilien und Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil durchgeführt.

Der Versuchsaufbau aus Aluminiumunterlage, Probe bzw. Probenpaket und Pyramidendruckstempel ist in Bild 3.14 dargestellt. Die Druckstempelabmessungen sind Bild 3.16 und die Prüfrandbedingungen Tab. 3.5 zu entnehmen. Bei geotextilen Verbundstoffen aus Gewebe und Vliesstoff wurde die Gewebeseite dem Pyramidendruckstempel zugewandt. Mit einer Druckprüfmaschine wurde der pyramidenförmige Druckstempel mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in das auf einer starren Unterlage liegende Probenpaket hineingedrückt und die Durchdrückkraft bei Erreichen der Perforation gemessen. Zur Bestimmung des Perforationszeitpunkts wurde eine elektrische Signaleinrichtung genutzt, die einen Kontakt zwischen dem leitfähigen Pyramidendruckstempel und der leitfähigen Aluminiumunterlage anzeigt.

b) Kraftgesteuerte Zeitstanddruckversuche

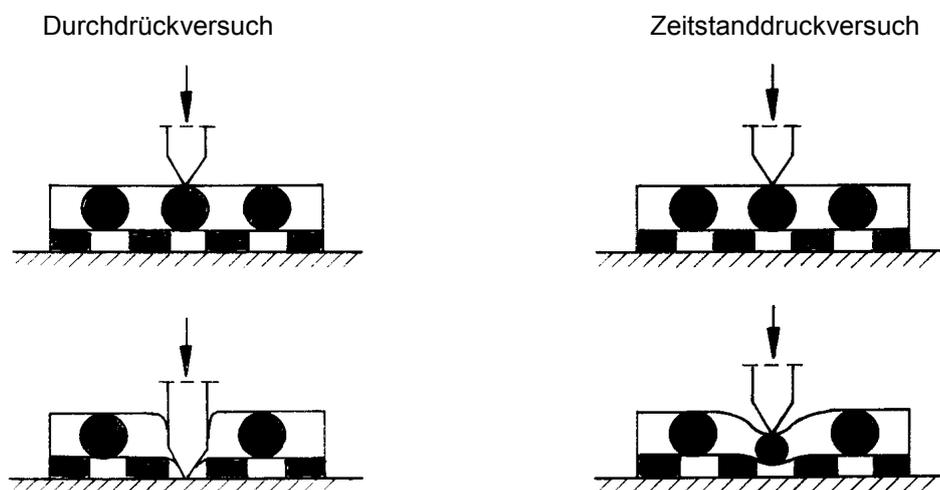
Es wurden kraftgesteuerte Zeitstanddruckversuche an Dichtungsbahnproben und Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil durchgeführt. Der Prüfsystemaufbau mit Aluminiumunterlage, Probe bzw. Probenpaket und Pyramidendruckkörper und die Druckstempelab-

messungen entsprachen denen der weggesteuerten Durchdrückversuche (Bild 3.14 und 3.16). Die Prüfrandbedingungen sind Tab. 3.5 zu entnehmen. Ebenso wie bei den Durchdrückversuchen wurde bei geotextilen Verbundstoffen aus Gewebe und Vliesstoff die Gewebeseite dem Pyramidendruckstempel zugewandt. In mechanischen Belastungsständen mit Hebelübersetzung wurde ein pyramidenförmiger Druckstempel mit über die Versuchsdauer konstanter Kraft in das Probenpaket hineingedrückt und die Eindrückung des Druckstempels bzw. die Dicke des Probenpaketes unter der Druckstempelspitze abhängig von der Zeit gemessen. Die Gewichte wurden vorsichtig ohne Stoß unmittelbar nacheinander aufgelegt. Nach der Entlastung und dem Probenausbau wurden die Einzeldicken der Geotextil- und Dichtungsbahnproben an der Eindruckstelle des Pyramidendruckkörpers gleich nach dem Ausbau und nach Abschluss der elastischen Rückverformungen gemessen. Hierzu wurde eine Messeinrichtung mit einem kegelförmigen Taster mit einem Öffnungswinkel von rd. 15° und einer Halbkugelspitze mit einem Radius von 0,5 mm verwendet. Bei sehr spitzen und kleinflächigen Eindrückungen wurde daher nicht die minimale Restdicke erfasst.

c) Zeitstandversuche mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung

Es wurden Zeitstandversuche mit kombinierter einaxialer Dehnungs- und Stempel-druckbeanspruchung an Dichtungsbahnproben und einigen ausgewählten Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil durchgeführt. Dazu wurde der im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 89.029/1997/B3 um eine Spannvorrichtung erweiterte Belastungsstand genutzt. Der Prüfsystemaufbau mit Aluminiumunterlage, Probenpaket und Pyramidendruckkörper und die Spannvorrichtung zur Aufbringung einer einaxialen Zug- bzw. Dehnungsbeanspruchung sind in Bild 3.15 skizziert. Die Druckstempelabmessungen entsprachen denen der Durchdrück- und Zeitstanddruckversuche. Die Prüfrandbedingungen sind Tab. 3.5 zu entnehmen. Ebenso wie bei den Durchdrück- und Zeit-

standdruckversuchen wurde bei geotextilen Verbundstoffen aus Gewebe und Vliesstoff die Gewebeseite dem Pyramidendruckstempel zugewandt. Mit Hilfe eines Motors wurde die Probe mit konstantem Vorschub von 0,37 mm/s einaxial um bis zu ca. 10 % gedehnt. Die aufgebrauchte Dehnung wurde für die weitere Versuchsdauer konstant gehalten. Eine Stunde nach Aufbringung der Dehnungsbeanspruchung wurde zusätzlich der pyramidenförmige Druckstempel mit über die weitere Versuchsdauer konstanter Kraft in das Probenpaket hineingedrückt und die Eindrückung des Druckstempels bzw. die Dicke des Probenpaketes unter der Druckstempelspitze abhängig von der Zeit gemessen. Nach der Entlastung und dem Probenausbau wurden wie bei den Zeitstanddruckversuchen die Einzeldicken der Geotextil- und Dichtungsbahnproben an der Eindrückstelle des Pyramidendruckkörpers gleich nach dem Ausbau und nach Abschluss der elastischen Rückverformungen gemessen.



Aufbau: Aluminiumunterlage, Dichtungsbahn und/oder Geotextil, Pyramidendruckkörper

Vorschub = konst.

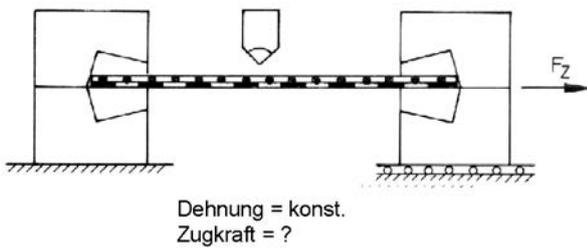
Druckkraft = konst.

Durchdrückkraft bei Perforation = ?

Dickenänderung = ?

Bild 3.14: Prinzipskizzen der weggesteuerten Durchdrückversuche und der kraftgesteuerten Zeitstanddruckversuche

1. Phase: konstante Dehnungsbeanspruchung



2. Phase: konstante Dehnungs- und Druckbeanspruchung

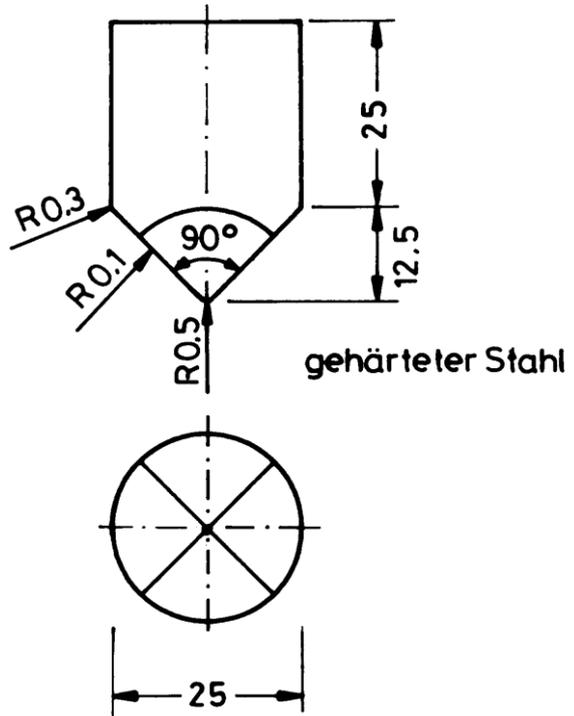
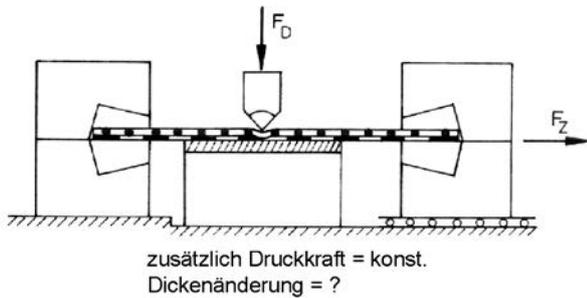


Bild 3.15: Prinzipskizzen der Zeitstandversuche mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung

Bild 3.16: Geometrie und Abmessungen des Druckstempels

	Weggesteuerte Durchdrückversuche	Kraftgesteuerte Zeitstanddruckversuche	Zeitstandversuche mit Dehnungs- und Druckbeanspruchung
Druckstempel	Pyramide aus gehärtetem Stahl (Abmessungen s. Bild 3.16)		
Unterlage	3 mm dicke Aluminiumunterlage (AlMgSi 1 F 32 DIN 1745 - 1)		
Prüftemperatur	Raumtemperatur		
Probenzustand	trocken	trocken und nass	Trocken
Probengröße und Probenbefestigung	∅ 100 mm, nicht eingespannt	∅ 100 mm, nicht eingespannt	100 mm Probenbreite, 164 mm freie Probenlänge, Einspannung in Dehnungsrichtung, keine Behinderung der Querdehnung
Weg- bzw. Kraftsteuerung	Vorschubgeschwindigkeit 1 mm/min	Versuchsserie mit variierten Prüfmaterialien mit konstanter Stempeldruckkraft von 200 N bei Dichtungsbahnen und 625 N bei Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil	Versuchsserie mit variierten Prüfmaterialien mit konstanter einaxialer Dehnung bis zu 10 % und konstanter Stempeldruckkraft von 200 N bei Dichtungsbahnen und 625 N bei Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil
Prüfdauer	je nach Proben- bzw. Probenpaketdicke	24 h konstante Druckbeanspruchung	1 h konstante Dehnungsbeanspruchung 24 h konstante Dehnungs- und Druckbeanspruchung
Versuchszahl	5 bis 10 je Probe bzw. Probenpaket	2 je Probenpaket	2 je Probenpaket

Tab. 3.5: Übersicht der Prüfrandbedingungen

3.4.2 Versuchsergebnisse

In Tab. 3.6 sind die Ergebnisse der weggesteuerten Durchdrückversuche, in Tab. 3.7 a) und b) die Ergebnisse der kraftgesteuerten Zeitstanddruckversuche und in Tab. 3.8 die Ergebnisse der Zeitstandversuche mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung tabellarisch zusammengestellt. Für die untersuchte PE- und PVC-Dichtungsbahn ergaben sich in Versuchen ohne geotextile Schutzschicht und in Versuchen mit gleicher geotextiler Schutzschicht annähernd gleiche Pyramidendurchdrückkräfte (Bild 3.17). In Zeitstanddruckversuchen mit dem gleichen Geotextil wies dagegen die PVC-Dichtungsbahn eine signifikant höhere Dickenreduzierung unter dem Pyramidendruckstempel auf.

Bild 3.18 zeigt die Ergebnisse von Durchdrück- und Zeitstanddruckversuchen mit unterschiedlichen Schutzschichten. Es sind jeweils die mittleren Pyramidendurchdrückkräfte und Dickenänderungen angegeben. Bei den Durchdrückversuchen an Geotextilien ohne Dichtungsbahn ist die Pyramidendurchdrückkraft des Verbundstoffs mit Bändchengewebe größer als die des Verbundstoffes mit Multifilamentgewebe, bei den Versuchen mit PE-Dichtungsbahn sind die Pyramidendurchdrückkräfte hingegen annähernd gleich. Bei den Durchdrückversuchen an Probenpaketen aus der Dichtungsbahn KDB2 PE 3 und unterschiedlichen Schutzschichten ergaben der Verbundstoff mit Multifilamentgewebe GT1 S+MG PP 1000 und der Verbundstoff mit Bändchengewebe GT3 S+BG PP 1000 die höchsten Pyramidendurchdrückkräfte von rd. 4400 N.

Nr.	Probenbezeichnung KDB/GT	mittlere Masse in g/m ² KDB/GT	mittlere Dicke in mm KDB/GT	Pyramidendurchdrückkraft in N				Versuchs- anzahl
				x*	s	x* - s	Minimum	
1	KDB2 PE 3 / -	3216 / -	3,38 / -	1208	31	1176	1176	5
2	KDB3 PVC 3 / -	4310 / -	3,24 / -	1163	43	1120	1107	6
3	- / GT1 S+MG PP 1000	- / 1059	- / 6,8	1477	251	1226	1176	10
4	- / GT3 S PP 800	- / 877	- / 7,3	1593	145	1448	1476	5
5	- / GT3 S+BG PP 1000	- / 1055	- / 8,1	1830	184	1646	1478	6
6	KDB2 PE 3 / DM1	3165/-	3,31/8,0	2230	83	2147	2157	6
7	KDB2 PE 3 / DM2	3177/850	3,33/7,5	2455	40	2415	2404	6
8	KDB2 PE 3 / GT1 S PP 800	3167/805	3,36/6,3	3430	186	3244	3224	10
9	KDB2 PE 3 / GT1 S+G PP 1000 ¹⁾	3210/976	3,36/5,5	3649	186	3463	3433	7
10	KDB2 PE 3 / GT1 S+MG PP 1000	3213/1072	3,33/7,0	4426	306	4120	4170	6
11	KDB2 PE 3 / GT2 E PP 1000	3180/1059	3,37/8,0	3757	278	3479	3527	6
12	KDB2 PE 3 / GT3 S PP 800	3224/933	3,37/7,3	3864	91	3773	3734	5
13	KDB2 PE 3 / GT3 S+BG PP 1000	3195/1073	3,34/8,3	4434	194	4240	4170	6
14	KDB3 PVC 3 / GT1 S PP 800	4327/840	3,24/6,4	3232	260	2973	3034	6

x*: Mittelwert
s: Standardabweichung
1) aus Lieferung für Vorhaben FE 89.029/1997/B3

Tab. 3.6: Ergebnisse der weggesteuerten Durchdrückversuche

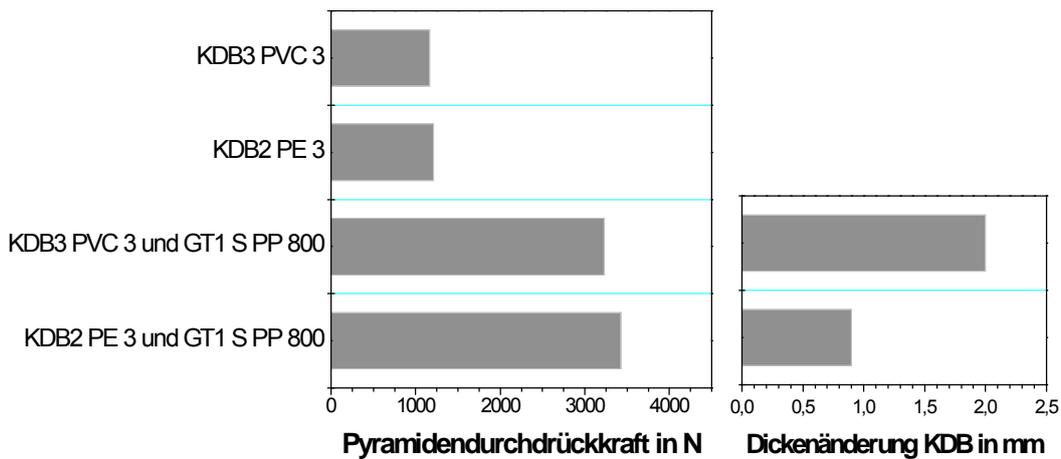


Bild 3.17: Ergebnisse von Durchdrück- und Zeitstanddruckversuchen mit PE- und PVC-Dichtungsbahn und gleichem Geotextil oder ohne Geotextil

Nr.	Prüfmaterial	Versuchsanzahl	Druckkraft in N	Geotextilmasse in g/m ²	Anfangsdicke in mm bei 2 kPa		
					KDB	GT	Summe
1	KDB2 PE 3 / -	2	200	-	3,35	-	3,35
2	KDB3 PVC 3 / -	2		-	3,20	-	3,20
3a	KDB2 PE 3 / DM1 (an Tiefpunkt)	1	625	-	3,32	8,0	11,32
3b	KDB2 PE 3 / DM1 (an Hochpunkt)	2		-	3,33	8,0	11,33
4	KDB2 PE 3 / DM2	1		820	3,35	-	-
5	KDB2 PE 3 / GT1 S PP 800	2		806	3,36	6,3	9,66
6	KDB2 PE 3 / GT1 S PP 800 nass	2		814	3,35	6,3	9,65
7	KDB2 PE 3 / GT1 S+G PP 1000 ¹⁾	2		985	3,32	5,6	8,92
8	KDB2 PE 3 / GT1 S+MG PP 1000	2		1090	3,36	7,0	10,36
9	KDB2 PE 3 / GT1 S+MG PP 1000 nass	2		1110	3,34	7,0	10,34
10	KDB2 PE 3 / GT2 E PP 1000	2		1070	3,35	8,4	11,75
11	KDB2 PE 3 / GT2 E PP 1000 nass	2		990	3,35	7,6	10,95
12	KDB2 PE 3 / GT3 S PP 800	2		925	3,35	7,5	10,85
13	KDB2 PE 3 / GT3 S PP 800 nass	2		960	3,35	7,6	9,69
14	KDB2 PE 3 / GT3 S+BG PP 1000	2		1010	3,36	8,2	11,56
15	KDB2 PE 3 / GT3 S+BG PP 1000 nass	2		1060	3,33	8,0	11,31
16	KDB3 PVC 3 / GT1 S PP 800	2		882	3,22	6,50	9,72

¹⁾ aus Lieferung für Vorhaben FE 89.029/1997/B3

Tab. 3.7a: Ergebnisse der kraftgesteuerten Zeitstanddruckversuche
Vor Versuchsbeginn ermittelte Werte

Nr.	Prüfmaterial	Dicke in mm unter Druckstempel nach ¹⁾ von				Restdicke in mm gleich nach dem Ausbau			Dickenänderung KDB in	
		1 min	15 min	1 h	24 h	KDB	GT	Summe	mm	%
1 ²⁾	KDB2 PE 3 / -	1,55	1,42	1,36	1,28	2,5	-	2,5	0,8	25
2 ²⁾	KDB3 PVC 3 / -	0,87	0,68	0,59	0,42	1,3	-	1,3	1,9	60
3a	KDB2 PE 3 / DM1 (an Tiefpunkt)	1,59	1,32	1,21	0,99	1,9	-	-	1,4	42
3b	KDB2 PE 3 / DM1 (an Hochpunkt)	1,12	0,88	0,79	0,62	1,5	-	-	1,8	54
4	KDB2 PE 3 / DM2	1,72	1,53	1,42	1,27	1,9	1,4	3,3	1,5	45
5	KDB2 PE 3 / GT1 S PP 800	2,51	2,31	2,21	2,04	2,4	0,9	3,3	0,9	27
6	KDB2 PE 3 / GT1 S PP 800 nass	2,60	2,40	2,31	2,10	2,4	1,1	3,4	1,0	30
7	KDB2 PE 3 / GT1 S+G PP 1000 ³⁾	2,67	2,50	2,40	2,24	2,5	1,0	3,5	0,8	24
8	KDB2 PE 3 / GT1 S+MG PP 1000	3,04	2,85	2,74	2,55	2,5	1,2	3,7	0,9	27
9	KDB2 PE 3 / GT1 S+MG PP 1000 nass	3,12	2,93	2,83	2,61	2,6	1,0	3,5	0,8	24
10	KDB2 PE 3 / GT2 E PP 1000	2,92	2,70	2,57	2,37	2,6	1,0	3,6	0,8	24
11	KDB2 PE 3 / GT2 E PP 1000 nass	2,78	2,57	2,44	2,17	2,8	1,2	3,9	0,6	18
12	KDB2 PE 3 / GT3 S PP 800	2,75	2,59	2,47	2,28	2,6	1,1	3,7	0,8	24
13	KDB2 PE 3 / GT3 S PP 800 nass	2,60	2,40	2,31	2,10	2,4	1,1	3,4	1,0	30
14	KDB2 PE 3 / GT3 S+BG PP 1000	2,86	2,70	2,60	2,41	2,7	1,3	4,0	0,7	21
15	KDB2 PE 3 / GT3 S+BG PP 1000 nass	2,94	2,79	2,68	2,50	2,6	1,4	4,0	0,7	21
16	KDB3 PVC 3 / GT1 S PP 800	2,03	1,81	1,69	1,42	1,2	1,0	2,2	2,0	62
¹⁾ Die Zeitzählung beginnt mit Abschluß der Lastaufbringung. ²⁾ nicht im Auftrag enthaltene Zusatzversuche ³⁾ aus Lieferung für Vorhaben FE 89.029/1997/B3										

Tab. 3.7b: Ergebnisse der kraftgesteuerten Zeitstanddruckversuche
Während und nach den Versuchen ermittelte Werte

Die Durchdrückkräfte der übrigen Geotextilien liegen im Bereich von rd. 3400 bis 3850 N, wobei der Vliesstoff GT3 S PP 800 sogar den größten Wert erreichte, der Endlosfaservliesstoff GT2 E PP 1000 rd. 3750 N und der Verbundstoff mit Monofilamentgewebe nur rd. 3650 N. Bei dem Vliesstoff GT3 S PP 800 ist die Spannweite der Masse relativ groß (s. auch Tab. 3.2). Die Massen der Proben dieses Geotextils für die Durchdrück- und Zeitstanddruckversuche lagen zwischen rd. 930 und 960 g/m², also für einen Vliesstoff mit einer Nennmasse von 800 g/m² recht hoch. Beide Dränmatten ergaben mit Abstand die niedrigsten Pyramidendurchdrückkräfte von von rd. 2230 und

2450 N. Bei den Zeitstanddruckversuchen variieren die Dickenreduzierungen der Dichtungsbahnen für unterschiedliche Geotextilien nur im Bereich zwischen rd. 0,7 und 0,9 mm. Es sind keine signifikanten Unterschiede vorhanden. Nur die Versuche mit den beiden Dränmatten DM1 und DM2 weisen signifikant höhere Eindrückungen der Dichtungsbahnen von rd. 1,4 bis 1,8 mm auf.

In Bild 3.19 sind die Ergebnisse von Zeitstanddruckversuchen mit trockenen und nassen Geotextilproben dargestellt. Die Dickenänderungen der Dichtungsbahnen unterscheiden sich bei trockenen und nassen Proben nur um rd. 0,1 bis 0,2 mm, was im Bereich der Streubreite der Versuche liegt.

Nr.		1 ²⁾	2 ²⁾	3	4	5
Prüfmateriale		KDB2 PE 3	KDB2 PVC 3	KDB2 PE 3 / GT1 S PP 800	KDB2 PE 3 / GT1 S+MG PP 1000	KDB2 PE 3 / GT3 S+BG PP 1000
Versuchsanzahl		2	2	2	2	2
Druckkraft in N		200		625		
Geotextilmasse in g/m ²		-	-	827	1037	1037
Anfangsdicke vor Einbau		3,35	3,20	3,28	3,28	3,31
	GT	-	-	6,4	7,1	7,6
	Summe	-	-	9,68	10,38	10,91
Dehnung in Produktionsrichtung in %		9,5	10,0	7,6	8,8	8,8
Zugkraft in N nach ¹⁾	1 min	1288	273	1138	1510	1565
	15 min	1254	263	1099	1396	1535
	1 h	1197	246	1064	1342	1467
	24 h	1080	193	972	1210	1320
Dicke in mm unter Druckstempel nach ¹⁾	1 min	1,44	1,00	2,36	2,80	2,77
	15 min	1,29	0,79	2,15	2,58	2,56
	1 h	1,20	0,69	2,04	2,48	2,43
	24 h	1,05	0,58	1,86	2,29	2,23
Restdicke in mm gleich nach dem Ausbau	KDB	2,2	2,0	2,1	2,6	2,4
	GT	-	-	0,9	1,4	1,3
	Summe	2,2	2,0	2,9	4,0	3,7
Dickenänderung KDB	in mm	rd. 1,1	rd. 1,2	rd. 1,2	rd. 0,7	rd. 0,9
	in %	33	37	37	21	27
¹⁾ Die Zeitzählung beginnt mit Abschluß der Aufbringung der Druckkraft.						
²⁾ nicht im Auftrag enthaltene Zusatzversuche						

Tab. 3.8: Ergebnisse der Zeitstandversuche mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung

Bild 3.20 vergleicht die Dickenänderungen der Dichtungsbahnen in Zeitstanddruckversuchen und in Zeitstandversuchen mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung. Für die Versuche ohne Schutzschicht sind die Dicken unter der Pyramidenstempelspitze unter Last nach einer Zeitdauer von 24 h, also unmittelbar vor Entlastung und Ausbau, angegeben. Bei diesen Versuchen dringt die Pyramidenstempelspitze unmittelbar in die Dichtungsbahn ein, so daß die Einkerbungen erheblich spitzer sind als in Versuchen mit geotextiler Schutzschicht und die Messung der Dichtungsbahndicke nach dem Ausbau erheblich ungenauer ist als bei Versuchen mit geotextiler Schutzschicht. Bei den Ver-

suchen mit Schutzschicht sind die nach dem Ausbau gemessenen Dickenänderungen angegeben. Unter Last kann in diesen Versuchen nur die Gesamtdicke von Dichtungsbahn und Geotextil gemessen werden. Im Rahmen des Untersuchungsprogramms konnte nur eine geringe Anzahl Zeitstandversuche mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung durchgeführt werden. Die Prüfmateriale wurden daher nur in Produktionsrichtung gedehnt und nur wenige Materialie untersucht. Aus den Versuchsergebnisse können daher nur erste Trends abgelesen werden. In den Versuchen ohne Schutzschicht deutet sich ein unterschiedliches Verhalten der PE- und PVC-

Dichtungsbahn an. Bei der PVC-Bahn wurde in den Versuchen mit kombinierter Dehnungs- und Druckbeanspruchung im Vergleich zu den Versuchen mit reiner Druckbeanspruchung nach 24 h unter Last eine um 0,16 mm größere Restdicke, bei der PE-Bahn im Gegensatz dazu eine um 0,23 mm geringere Restdicke festgestellt als in den Versuchen mit reiner Druckbeanspruchung (Bild 3.20). Die unter Last nach 24 h ermittelten Dickenreduktionen der PVC-Dichtungsbahnproben lagen mit mehr als 80 % der Anfangsdicke deutlich über denen der PE-Dichtungsbahnen mit Werten zwischen rd. 60 und 70 %. Bei den Versuchen mit

PE-Dichtungsbahn und unterschiedlichen Geotextilien deuten sich mögliche Unterschiede zwischen Vliesstoffen und Verbundstoffen an. Bei dem Stapelfaservliesstoff GT1 S PP 800 war die Dickenänderung der Dichtungsbahn in den Versuchen mit kombinierter Beanspruchung um rd. 0,3 mm höher als in den Versuchen mit reiner Druckbeanspruchung. Bei den Verbundstoffen ergaben sich hingegen für das Geotextil mit Multifilamentgewebe eine gleich große Dickenänderung und für das Geotextil mit Bändchengewebe eine um rd. 0,2 mm größere Dickenänderung.

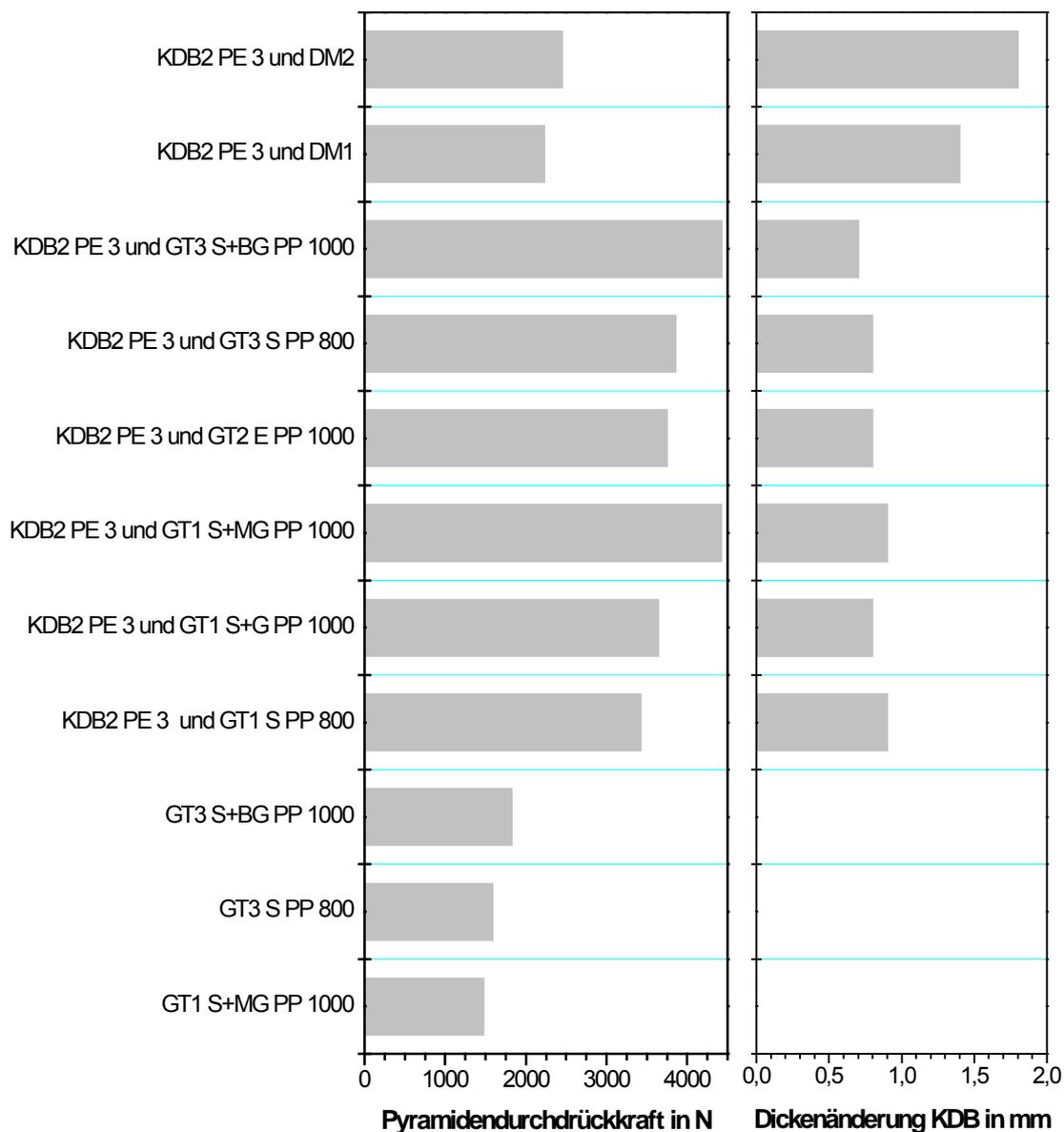


Bild 3.18: Ergebnisse von Durchdrück- und Zeitstanddruckversuchen mit variierten Schutzschichten und gleicher PE-Dichtungsbahn

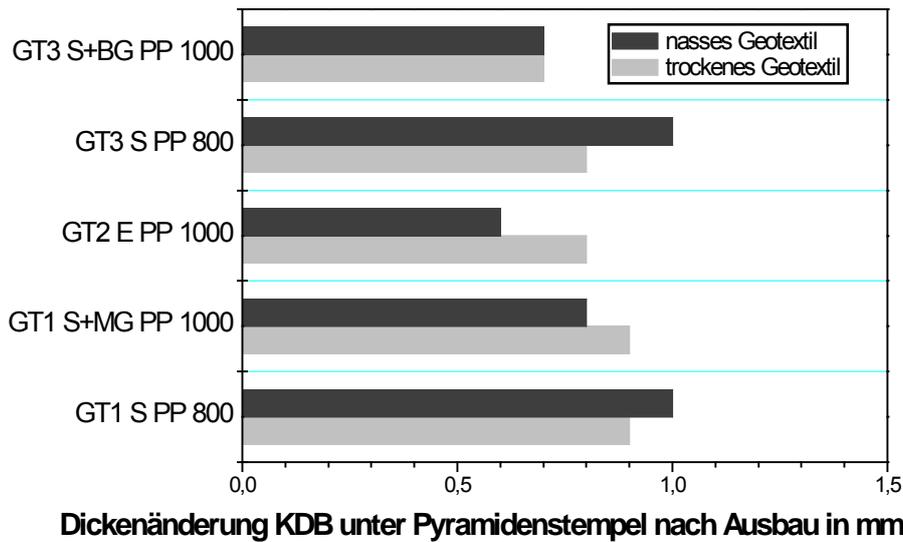


Bild 3.19: Ergebnisse von Zeitstanddruckversuchen mit trockenen und nassen Geotextilien

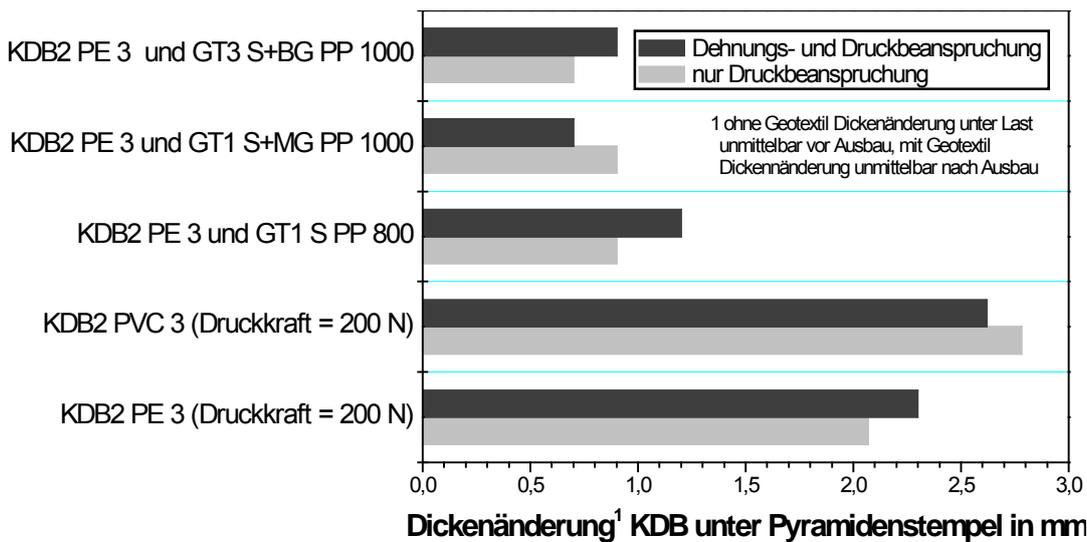


Bild 3.20: Vergleich der Ergebnisse von Zeitstanddruckversuchen und Zeitstandversuchen mit Dehnungs- und Druckbeanspruchung

3.5 Auswertungen mit Berücksichtigung der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 89.029/1997/B3

Bild 3.21 zeigt die mittleren Pyramidendurchdrückkräfte der Geotextilien in Durchdrückversuchen und Bild 3.22 die mittleren Dicken der Dichtungsbahnen unter dem Pyramidenstempel gleich nach dem Ausbau aus Zeitstanddruckversuchen abhängig von der Höchst-

zugkraft der Geotextilien am 1. Maximum der Zugkraft-Dehnungslinie.

In Bild 3.23 sind die mittleren Pyramidendurchdrückkräfte der Geotextilien in Durchdrückversuchen und in Bild 3.24 die mittleren Dicken der Dichtungsbahnen unter dem Pyramidenstempel gleich nach dem Ausbau aus Zeitstanddruckversuchen abhängig von der Sekantensteifheit der Geotextilien bei 15 % Dehnung der Zugkraft-Dehnungslinie dargestellt.

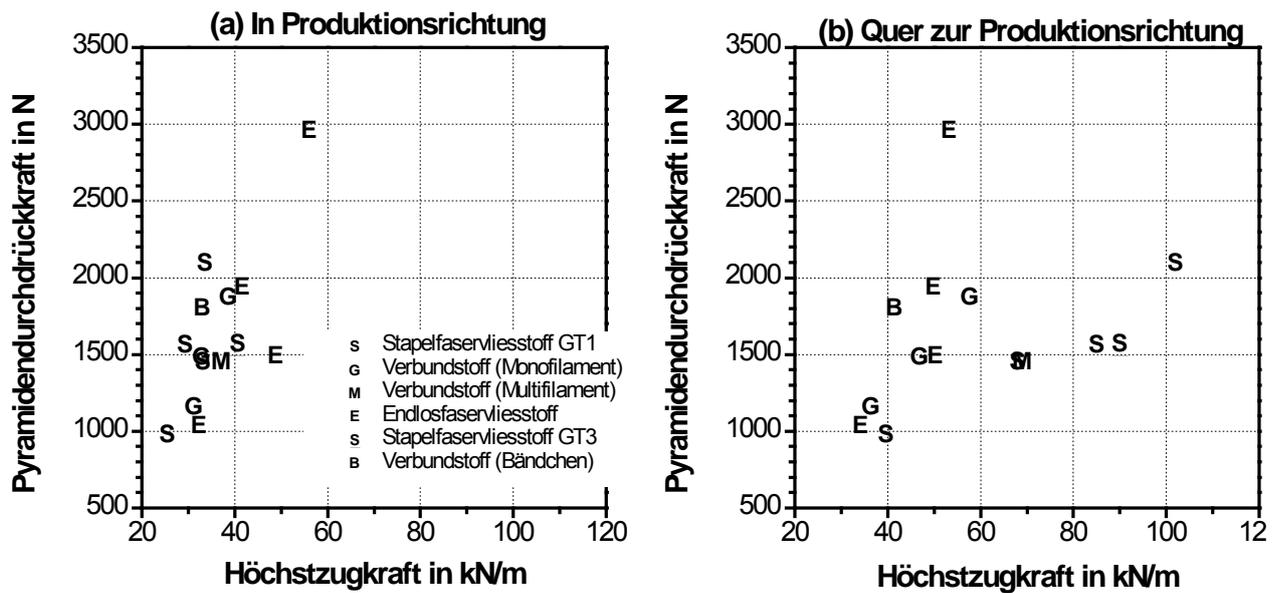


Bild 3.21: Pyramidendurchdrückkräfte der Geotextilien in Durchdrückversuchen abhängig von der Höchstzugkraft der Geotextilien am 1. Maximum der Zugkraft-Dehnungslinie

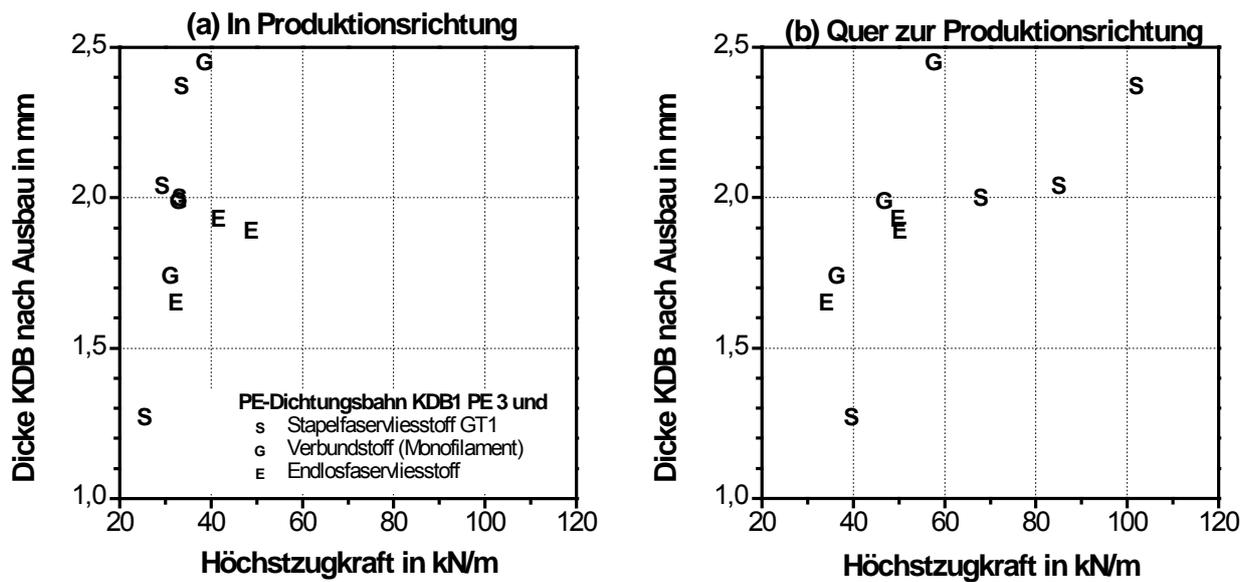


Bild 3.22: Dicken der Dichtungsbahnen unter dem Pyramidendruckstempel gleich nach dem Ausbau aus Zeitstanddruckversuchen abhängig von der Höchstzugkraft der Geotextilien am 1. Maximum der Zugkraft-Dehnungslinie

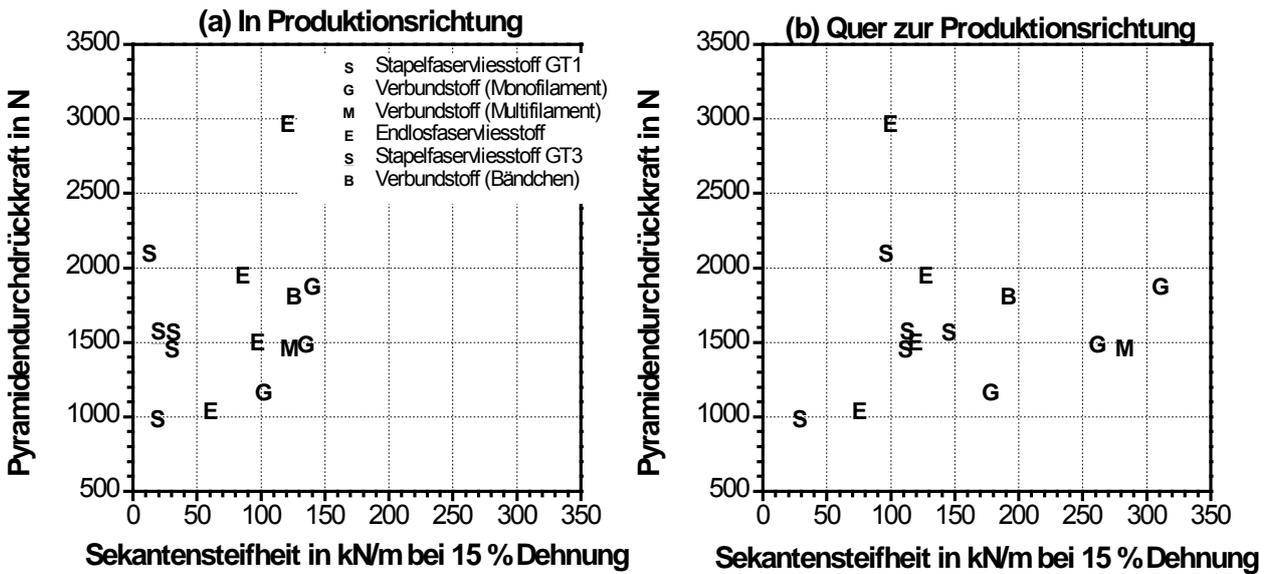


Bild 3.23: Pyramidendurchdrückkräfte der Geotextilien in Durchdrückversuchen abhängig von der Sekantensteifheit der Geotextilien bei 15 % Dehnung der Zugkraft-Dehnungslinie

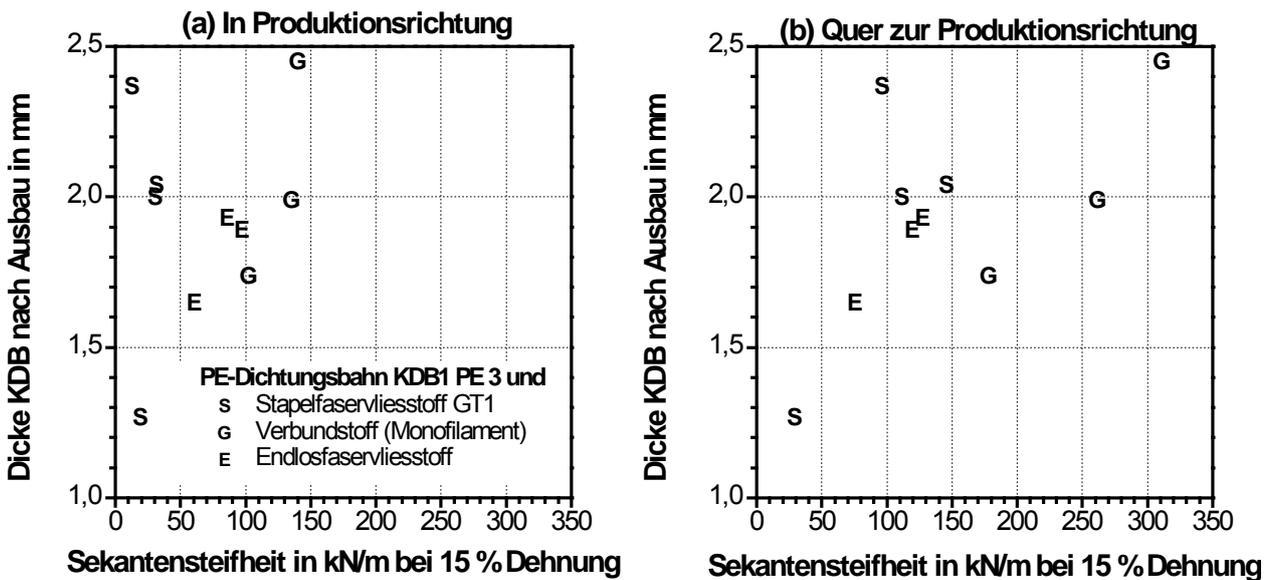


Bild 3.24: Dicken der Dichtungsbahnen unter dem Pyramidendruckstempel gleich nach dem Ausbau aus Zeitstanddruckversuchen abhängig von der Sekantensteifheit der Geotextilien bei 15 % Dehnung der Zugkraft-Dehnungslinie

Bild 3.25 stellt die mittleren Pyramidendurchdrückkräfte der Geotextilien in Durchdrückversuchen und Bild 3.26 die mittleren Dicken der Dichtungsbahnen unter dem Pyramidenstempel gleich nach dem Ausbau aus Zeitstanddruckversuchen abhängig von der Stempeldurchdrückkraft der Geotextilien dar.

Bei den Darstellungen der Dickenänderungen der Dichtungsbahnen in Bild 3.22, 3.24 und 3.26 konnten keine Zeitstandversuche mit den in diesem Untersuchungsprogramm neu aufgenommenen Geotextilien berücksichtigt werden, da die Versuche mit diesen Geotextilien mit der Dichtungsbahn KDB2 PE 3 und nicht mehr KDB1 PE 3 durchgeführt wurden.

Aus den Ergebnissen der Schutzwirksamkeitsuntersuchungen in Form von Durchdrückversuchen und Zeitstanddruckversuchen mit Pyramidenstempel lassen sich keine eindeutigen Zusammenhänge mit den Höchstzugkräften und Sekantensteifigkeiten aus den Zugversuchen an den Geotextilien ableiten. Die Pyramidendurchdrückkräfte in den Durchdrückversuchen und die Dicken der

Dichtungsbahnen unter dem Pyramidenstempel nach dem Ausbau aus Zeitstanddruckversuchen steigen für gleiche Geotextiltypen mit zunehmender Stempeldurchdrückkraft an. Eindeutige Unterschiede zwischen Vliesstoffen und Verbundstoffen aus Vliesstoff und Gewebe sind für die Durchdrückversuche hingegen nicht zu erkennen.

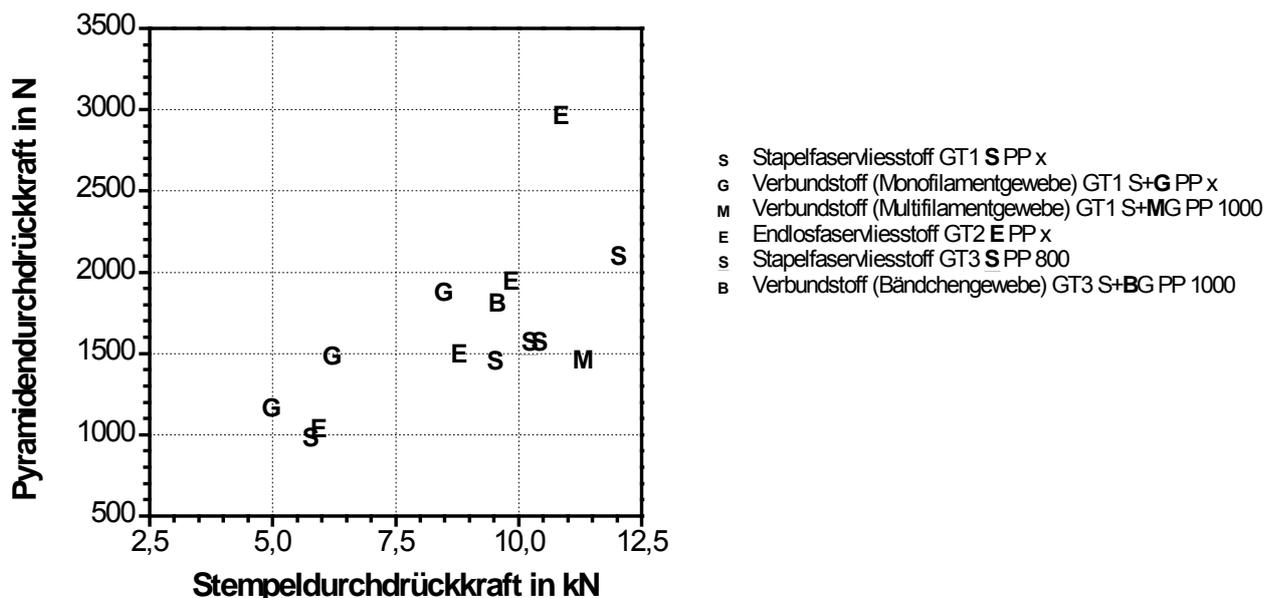


Bild 3.25: Pyramidendurchdrückkräfte der Geotextilien in Durchdrückversuchen abhängig von der Stempeldurchdrückkraft der Geotextilien

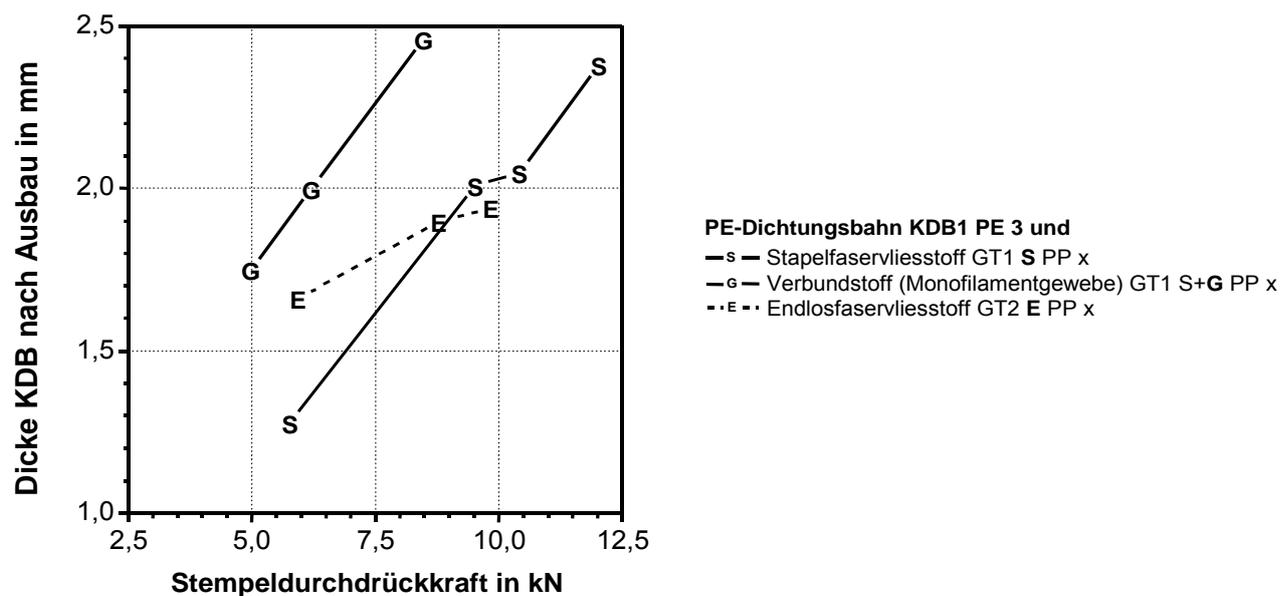


Bild 3.26: Dicken der Dichtungsbahnen unter dem Pyramidenstempel gleich nach dem Ausbau aus Zeitstanddruckversuchen abhängig von der Stempeldurchdrückkraft der Geotextilien

4 Flächendruck- und Berstdruckversuche der STUVA

In der Tunnelbauphase wird die Hautabdichtung vorrangig durch Flächendruck belastet, der im wesentlichen durch den Betoniervorgang und im Verlauf der Firstinjektion entsteht. Ferner ergibt sich während der Baudurchführung eine weitere Belastung im Sohlbereich durch Begehen und Befahren. In späteren Betriebsphasen können Flächendrücke und mehrachsige Zugbeanspruchungen sowohl durch Verkehrslast als auch durch Gebirgsverformungen hervorgerufen werden. In Flächendruckversuchen im Brunnentopf und in Berstdruckversuchen soll das Materialverhalten der Kunststoffdichtungsbahnen in Bezug auf die genannten Beanspruchungen untersucht werden.

4.1 Flächendruckversuche im Brunnentopf

4.1.1 Ziel der Versuche und Versuchsprogramm

Ziel der Brunnentopfversuche ist es, die möglichen Schädigungen (z.B. Eindrückungen) der Kunststoffdichtungsbahnen bei großer Zugbeanspruchung z.B. infolge sackartiger Verformungen der Kunststoffdichtungsbahn während des Betoniervorgangs in Ausbauchungen der Spritzbetonschale hinein zu prüfen.

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen des Forschungsvorhabens FE 89.029/1997/B3 "Untersuchung der Schutzwirksamkeit von Geotextilien bei Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen" [2] und den Beratungsergebnissen des Arbeitskreises 5.1 der DGGT (Untergruppe 6) sowie der Arbeitsgruppe der ZTV-Abdichtung der BASt ergibt sich folgender Untersuchungsbedarf für Flächendruckversuche im Brunnentopf:

(1) Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes der Geotextilien

Bisher wurden von der STUVA die Geotextilien im trockenen Zustand geprüft [2, 6, 7]. Bei Tunneln mit von außen drückendem Wasser werden jedoch die Geotextilien durchfeuchtet. Ob durchfeuchtete Geotextilien die gleiche Schutzwirksamkeit besitzen wie trockene, sollte nun anhand von Flächendruckversuchen mit trockenem und feuchtem Endlosfaservlies (GT2-E-PP-1000) geklärt werden. Das zu durchfeuchtende Geotextil wird im trockenen Zustand auf die Abdichtungsrücklage gelegt und dann befeuchtet, bevor die Kunststoffdichtungsbahn eingebaut wird.

(2) Einfluss der Gewebeart bei Verbundstoffen

Im Tunnelbau werden in der Regel geotextile Schutzschichten aus Faservliesstoffen verwendet. Neuere Entwicklungen zum besseren Schutz der Kunststoffdichtungsbahn gehen jedoch auch dahin, Geotextilien aus Verbundstoffen, bestehend aus einem Faservliesstoff und einer Gewebeauflage, im Tunnelbau einzusetzen. In dieser Brunnentopfversuchsreihe wurden deshalb zwei Verbundstoffe mit einer Gewebeauflage aus Bändchen- (Bild 2.3) bzw. Multifilamentgewebe (Bild 2.2) geprüft. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Gewebeart im Vergleich der beiden Verbundstoffe untereinander und zu den Geotextilien aus Vliesstoff untersucht.

(3) Wirksamkeit von Dränmatten

Zur Ableitung des Gebirgswassers im Tunnel werden beispielsweise spezielle Dränmatten verwendet. Diese Dränmatten werden nicht als Schutzschicht eingesetzt. In den Brunnentopfversuchen sollte jedoch eine eventuelle Schutzwirksamkeit dieser Dränmatten sowie die Funktion des Dränagesystems unter Wasserdruckbelastung geprüft werden.

(4) Fehlende geotextile Schutzschicht

Der Tunnel Füssen-Reutte wurde gänzlich ohne geotextile Schutzschicht gebaut. Ob Kunststoffdichtungsbahnen ohne Schutzschicht einen Tunnel beispielsweise über einen Zeitraum von 100 Jahren wirkungsvoll vor eindringendem Wasser schützen, ist nicht bekannt. Auch Flächendruckversuchsreihen ohne Schutzschicht im Brunnentopf liegen bisher nicht vor. Deshalb wurde in Flächendruckversuchen im Brunnentopf beispielhaft der Grad der Beschädigung von PVC- und PE-Kunststoffdichtungsbahnen

bei fehlender geotextiler Schutzschicht dokumentiert.

(5) Streuung der Versuchsergebnisse

Bisher wurde in den Brunnentopfversuchsreihen der STUVA [2, 6, 7] in der Regel nur ein einziger Flächendruckversuch pro Abdichtungspaket durchgeführt. Inwieweit die Versuchsergebnisse streuen bzw. reproduzierbar sind, konnte deshalb noch nicht angegeben werden. Deshalb wurde ein erster orientierender Wiederholungsversuch (Versuch Nr. 9) durchgeführt.

Unter Beachtung dieses Untersuchungsbedarfs ist das Versuchsprogramm (Tabelle 4.1) zusammengestellt worden.

4.1.2 Versuchsbeschreibung und Versuchsprogramm

Die Flächendruckversuche wurden in Brunnentöpfen mit einem lichten Innendurchmesser von 1000 mm durchgeführt. In den Brunnentopf wurde die Abdichtungsrücklage und darüber der zu prüfende Abdichtungsaufbau entsprechend dem Versuchsprogramm eingebaut (Bild 4.1). Der Abdichtungsaufbau wurde für mindestens 4 Tage mit einer Wasserdruckbelastung von 4 bar beansprucht.

Die verwendete Abdichtungsrücklage besaß eine "Eierkarton"-Struktur mit Stichmaßen und Ausrundungshalbmessern von 100 mm. Dieser Ausrundungshalbmesser ist nur halb so groß wie der in den Regelwerken Ril 853 der DB AG und ZTV-Tunnel festgelegte Mindestradius [8, 9]. Die Kunststoffdichtungsbahnen, geotextilen Schutzschichten und Dränmatten wurden daher in den Versuchsreihen entsprechend stark beansprucht.

Vor und unmittelbar nach der Flächendruckbelastung im Brunnentopf wurde die Dicke der Kunststoffdichtungsbahn gemessen, um den Grad der Beanspruchung ermitteln zu können. Die lokale

Restdicke der Kunststoffdichtungsbahn wurde hierzu nach dem Versuch außerhalb des Brunnentopfes an besonders starken Eindrückungen gemessen.

Bei Versuchen mit Dränmatten wurde nach der Versuchsstandzeit von 4 Tagen die Dränfunktion der Dränmatte geprüft. Hierzu wurde bei bestehender flächiger Wasserdruckauflast (4 bar) mittig durch die Abdichtungsrücklage unterhalb der Dränmatte Wasser zugeführt (Bild 4.2). Dieses Wasser (Wasserdruck am Zulauf ca. 0,1 bar) floss bei intakter Dränmatte von der Mitte bis zu den äußeren Rändern der Abdichtungsrücklage. Wenn das Wasser am Außenrand der Abdichtungsrücklage herunterlief und am Leckwasserabfluß des Brunnentopfes austrat, war die Dränagewirksamkeit der Dränmatte bei Aufrechterhaltung der Flächendruckbelastung nachgewiesen.

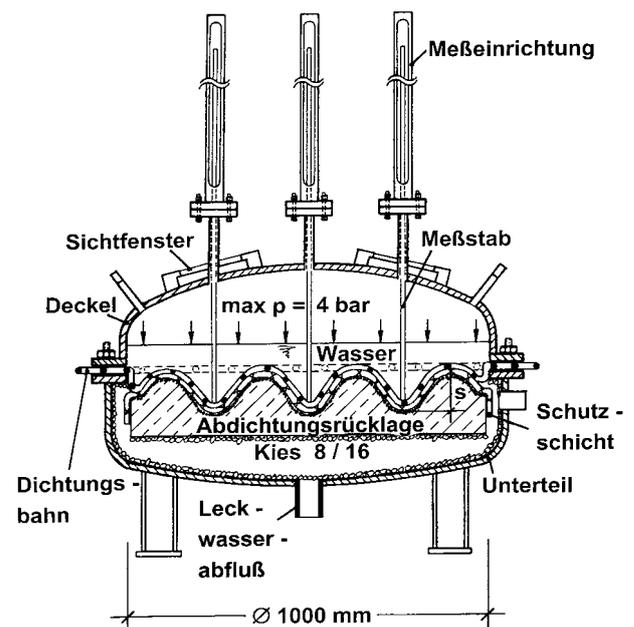


Bild 4.1: Brunnentopf für Flächendruckversuche

Nr.	Schutzschicht ¹⁾		KDB		KDB-Dicke				
	Proben- bezeichnung	Produktbeschreibung	Proben- bezeichnung	Eigenschaft	vor Versuch	nach Versuch			max. Eindrückung ⁴⁾ [mm]
					Mittel ²⁾ [mm]	Mittel ²⁾ [mm]	Eindrückung ⁴⁾ [mm]	Minimalwert ³⁾ [mm]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 = 6 - 9
1	GT2-E-PP-1000	Endlosfaservlies, trocken	KDB2-PE-3	PE, 3 mm	3,4	3,1	0,3	3,0	0,4
2	GT2-E-PP-1000	Endlosfaservlies, feucht	KDB2-PE-3	PE, 3 mm	3,4	3,1	0,3	3,0	0,4
3	GT3-S+BG-PP-1000	Verbund 1: Stapel+ Bändchen	KDB2-PE-3	PE, 3 mm	3,3	3,1	0,2	3,0	0,3
4	GT1-S+MG-PP-1000	Verbund 2: Stapel + Multifilament	KDB2-PE-3	PE, 3 mm	3,3	3,1	0,2	3,0	0,3
5	DM 1-PEHD	Dränmatte 1: Noppen	KDB2-PE-3	PE, 3 mm	3,3	3,0	0,3	2,7	0,6
6	DM 2-PP	Dränmatte 2: Wirrgelege + Vlies	KDB2-PE-3	PE, 3 mm	3,3	3,0	0,3	2,9	0,4
7	keine	keine	KDB2-PE-3	PE, 3 mm	3,3	2,7	0,6	2,3	1,0
8	keine	keine	KDB3-PVC-3	PVC, 3 mm	3,1	2,3	0,8	0,9 ⁵⁾	2,2
9	GT1-S-PP-1000	Stapelfaservlies, trocken	KDB3-PVC-3	PVC, 3 mm	3,1	2,8	0,3	2,6	0,5
9A	GT1-S-PP-1000	Stapelfaservlies, trocken	KDB3-PVC-3	PVC, 3 mm	2,8	2,4	0,4	2,3	0,5

¹⁾ Geotextil- oder Verbundstoffmasse: g = 1.000 g/m² ²⁾ Mittelwert aus 10 Messwerten ³⁾ Kleinster gemessener Wert von 10 Messwerten

⁴⁾ Einkerbung in die KDB bezogen auf die mittlere Ausgangsdicke (Tabellenspalte 6) vor dem Versuch ⁵⁾ Kunststoffdichtungsbahn perforiert und undicht

Versuchsergebnis aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben FE 89.029/1997/B3

Tab. 4.1: Brunnentopf-Versuchsprogramm und Dicken der Kunststoffdichtungsbahnen vor und nach der Flächendruckbelastung

mit Bändchengewebe (Versuch Nr. 3, GT3-S+BG-PP-1000) bzw. Multifilamentgewebe (Versuch Nr. 4, GT1-S+MG-PP-1000) in Kombination mit der PE-Bahn (KDB2-PE-3) geprüft. Nach der Flächendruckbelastung im Brunnentopf betragen die maximalen bzw. mittleren Eindrückungen bei beiden PE-Kunststoffdichtungsbahnen ca. 0,3 mm bzw. 0,2 mm (Bild 4.3). Dies bedeutet, dass bei den hier untersuchten Verbundstoffen keine nennenswerten Unterschiede bezüglich der Schutzwirksamkeit von Bändchen- und Multifilamentgewebe festgestellt werden konnten.

(4) Vergleich Endlosfaservlies und Verbundstoffe

Mit den beiden Verbundstoffen (Versuch Nr. 3, GT3-S+BG-PP-1000 und Versuch Nr.4, GT1-S-MG-PP-1000) konnte mit den maximalen gemessenen Eindrückungen von ca. 0,3 mm zwar die beste Schutzwirksamkeit für die hier verwendete PE-Kunststoffdichtungsbahn (KDB2-PE-3) festgestellt werden.

Die maximal gemessenen Eindrückungen von etwa 0,4 mm beim Endlosfaservlies (Versuche Nr. 1 und Nr. 2, GT-E-PP-1000) waren jedoch nur geringfügig größer (Bild 4.3).

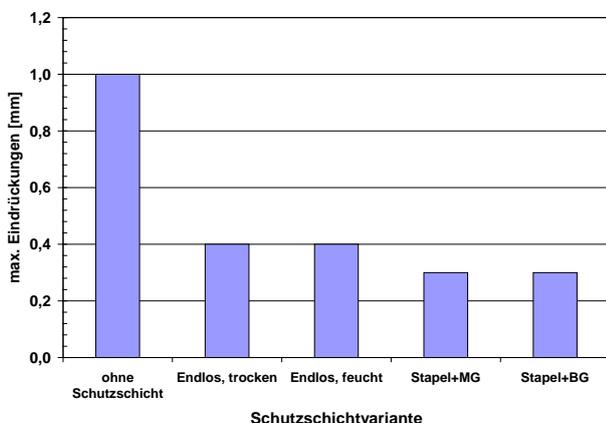


Bild 4.3: Maximale Eindrückungen in die PE-Bahnen (KDB2-PE-3) ohne und mit geotextilen Schutzschichten (MG = Multifilamentgewebe, BG = Bändchengewebe)

(5) Dränmatten

a) Dränmatte mit Noppen

Die im Versuch Nr. 5 geprüfte Dränmatte (DM1-PEHD) besitzt ca. 8 mm hohe Noppen und besteht aus PEHD (Bild 4.2). Im Vergleich zu den untersuchten Vliesen bzw. Verbundstoffen ist die Dränmatte relativ steif. Trotz dieser Materialeigenschaft schmiegte sich diese Dränmatte bei der Wasserdruckbelastung von 4 bar relativ gut an die Abdichtungsrücklage (Foto 7). Jedoch wurden hierdurch die steifen Noppen der Dränmatte aus PEHD so verformt, dass Bereichsweise scharfe Kanten entstanden. Diese können möglicherweise zu einer sehr starken punktuellen Beanspruchung der Kunststoffdichtungsbahn führen. Zwischen Dränmatte und der PE-Kunststoffdichtungsbahn (KDB2-PE-3) wurde keine zusätzliche Schutzschicht eingebaut. Nach dem Versuch konnten maximale bzw. mittlere Eindrückungen in die PE-Kunststoffdichtungsbahn (KDB2-PE-3) von ca. 0,6 mm bzw. 0,3 mm gemessen werden (Bild 4.4).

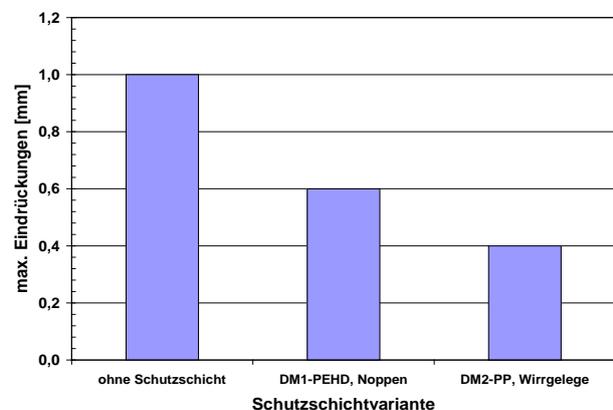


Bild 4.4: Maximale Eindrückungen in PE-Bahnen (KDB2-PE3) ohne Schutzschicht und bei Verwendung von Dränmatten

b) Dränmatte mit Wirrgelege und Vlieskaschierung

Die im Versuch Nr. 6 geprüfte Dränmatte (DM2-PP) besteht aus einem zick-zackförmigen Wirrgelege mit einer angenähten Vlieskaschierung (Vliesmasse: ca. 200 g/m², Bild 4.3). Die Dränmatte DM2-PP passte sich bei 4 bar Wasserdruckbelastung im Brunnentopf gut an die Eierkartonstruktur der Abdichtungsrücklage an (Foto 8). Die maximale bzw. mittlere Eindrückung in die PE-Bahn (KDB2-PE-3) betrug etwa 0,4 mm bzw. 0,3 mm. Die maximale Eindrückung ist damit genau so groß wie beim Endlosfaservlies und deutlich kleiner als bei der Dränmatte DM1-PEHD mit Noppen und **ohne** Vlieskaschierung (Bild 4.4).

(6) Dränwirkung der Dränmatten

Die beiden Dränmatten (Versuch Nr. 5, DM1-PEHD und Versuch Nr. 6, DM2-PP) wurden nach der Standzeit von mindestens 4 Tagen bei 4 bar Wasserdruck im Brunnentopf auf ihre Dränfähigkeit geprüft.

Bei beiden untersuchten Dränmatten (Tabelle 2.3) konnte auf diese Weise die Dränfunktion bei einem Wasserdruck am Zulauf des Dränwassers von ca. 0,1 bar und einer Flächendruckbelastung von etwa 4,0 bar nachgewiesen werden.

(7) Streubereich der Versuchsergebnisse

Um den Streubereich der Brunnentopfversuchsergebnisse ansatzweise einzugrenzen,

wurde ein Wiederholungsversuch zu dem Versuch mit PVC-Kunststoffdichtungsbahn (KDB3-PVC-3) und Stapelfaservlies (GT1-S-PP-1000) des vorangegangenen Forschungsvorhabens FE 89.029/1997/B3 [2] unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

a) Stapelfaservlies derselben Charge

Beim Wiederholungsversuch wurde eine Rückstellprobe des Stapelfaservlieses GT1-S-PP-1000 aus der Materiallieferung von 1998 des vorangegangenen Forschungsvorhabens verwendet.

b) PVC- Kunststoffdichtungsbahntyp unterschiedlicher Charge

Es wurde im Wiederholungsversuch der gleiche PVC-Kunststoffdichtungsbahntyp KDB3-PVC-3 verwendet, jedoch musste eine im Jahr 2000 gelieferte Bahn eingesetzt werden, da aus der Lieferung

von 1998 keine ausreichende Materialmenge zur Verfügung stand. Die Identifikationsuntersuchungen im Februar 2001 an den Kunststoffdichtungsbahnen der beiden unterschiedlichen Lieferungen (1998 und 2000) am Süddeutschen Kunststoffzentrum zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede der Materialeigenschaften (Tabelle 4.2).

c) Abdichtungsrücklage

Es wurde eine andere Abdichtungsrücklage mit derselben Geometrie und gleicher Zuschlagskorngruppe, jedoch nicht identischer Verteilung der Zuschlagkörner auf der Abdichtungsrücklage eingesetzt.

KDB3-PVC-3	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m ²]	Sekantenmodul [N/mm ²]		Reißfestigkeit [N/mm ²]		Reißdehnung [%]	
			längs	quer	längs	quer	längs	quer
Charge 1998	3,19	4338	13,3	13,6	16,4	14,1	324	317
Charge 2000	3,17	4332	15,1	13,5	16,4	14,6	326	328

Tab. 4.2: Materialdaten von KDB3-PVC-3 von zwei unterschiedlichen Chargen (Werte wurden vom Süddeutschen Kunststoffzentrum ermittelt)

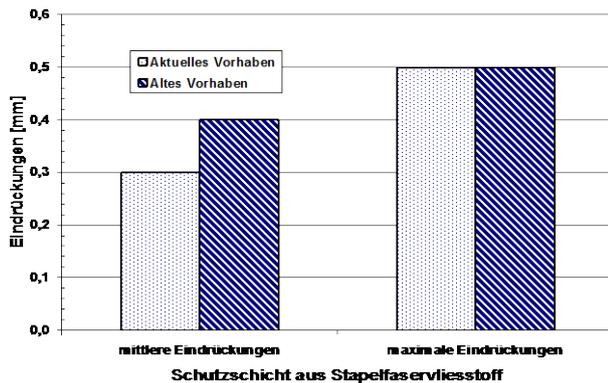


Bild 4.5: Vergleich der maximalen und mittleren Eindrückungen in die PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) des Erst- (Vorhaben FE 89.029/1997/B3, [2]) und Wiederholungsversuchs (aktuelles Vorhaben)

Im Versuch Nr. 9A (vorangegangenes Forschungsvorhaben) und im Wiederholungsversuch (jetziges Forschungsvorhaben, Versuch Nr. 9) wurden mit etwa 0,5 mm die gleichen **maximalen** Eindrückungen in die PVC-Kunststoffdichtungsbahn (KDB3-PVC-3) gemessen (Bild 4.5). Die **mittleren** Eindrückungen in die PVC-Bahn betragen hingegen bei Versuch Nr. 9A ungefähr 0,4 mm und bei Versuch Nr. 9 (Wiederholungsversuch) nur etwa 0,3 mm (Bild 4.5).

Ein Vergleich der beiden Versuche Nr. 9 und 9A zeigt, dass die Brunnentopfversuchsergebnisse nur geringfügig streuen. Jedoch sollte durch weitere Wiederholungsversuche der Streubereich auch statistisch zuverlässig eingegrenzt werden.

4.1.4 Zusammenfassung der Flächendruckversuche

Die wichtigsten Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erwartungsgemäß wiesen beide Kunststoffdichtungsbahntypen (PE und PVC) bei fehlender Schutzschicht jeweils die größten Eindrückungen auf (ca. 1 mm bzw. etwa 2,2 mm). Die 3 mm dicke PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) wurde im Versuch an einer Stelle perforiert und dadurch undicht. Dies zeigt deutlich, dass Kunststoffdichtungsbahnen für den Tunnelbau nicht ohne geotextile Schutzschicht verlegt

werden sollten. Dies gilt insbesondere für PVC-Bahnen.

- Der Feuchtigkeitsgehalt vom Endlosfaservlies (GT2-E-PP-1000, feucht bzw. trocken) hatte keinen Einfluss auf die Schutzwirksamkeit des Vlieses. Die maximalen bzw. mittleren Eindrückungen in die PE-Bahn (KDB2-PE-3) betragen in beiden Fällen ca. 0,4 mm bzw. 0,3 mm.
- Den besten Schutz boten die beiden geprüften Verbundstoffe aus Stapelfaservliesstoff und Multifilamentgewebe (GT1-S+MG-PP-1000) bzw. aus Stapelfaservliesstoff und Bändchengewebe (GT3-S+BG-PP-1000). Die maximalen bzw. mittleren Eindrückungen in die PE-Bahn (KDB2-PE-3) beliefen sich bei beiden Schutzschichten auf etwa 0,3 mm bzw. 0,2 mm.
- Die Versuche mit Dränmatten zeigten deutlich, dass die geprüften Dränmatten eine gewisse Schutzwirksamkeit besitzen, da in diesen Versuchen je nach Dränmattentyp maximale Eindrückungen von ca. 0,4 mm (DM2-PP) bzw. 0,6 mm (DM1-PEHD) gemessen wurden. Ohne Dränmatten oder geotextile Schutzschicht erreichten die maximalen Eindrückungen in die PE-Bahn Werte bis zu ca. 1 mm (Versuch Nr. 1).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass auf geotextile Schutzschichten im Tunnelbau nicht verzichtet werden sollte. Die Schutzschichten sollten eine Nennmasse von ca. 1000 g/m² besitzen.

4.2 Berstdruckversuche

4.2.1 Ziel der Versuche

Kunststoffdichtungsbahnen können im Tunnelbauwerk durch mehrachsige Zugbeanspruchung belastet werden. Im Berstdruckversuch wurden bisher von der STUVA nur unbeschädigte Bahnen eingesetzt [6, 11, 12]. Wie sich Beschädigungen von Kunststoffdichtungsbahnen auf deren mehrachsiges Dehnungsverhalten auswirken ist nicht bekannt. Ziel dieser Berstdruckversuchsreihe ist es deshalb, das mehrachsige Dehnungsverhalten von im Flächendruckversuch bereits vorbelasteten Kunststoffdichtungsbahnen zu bestimmen und dieses Ergebnis mit im Berstdruckversuch getesteten,

unbeschädigten Kunststoffdichtungsbahnen zu vergleichen.

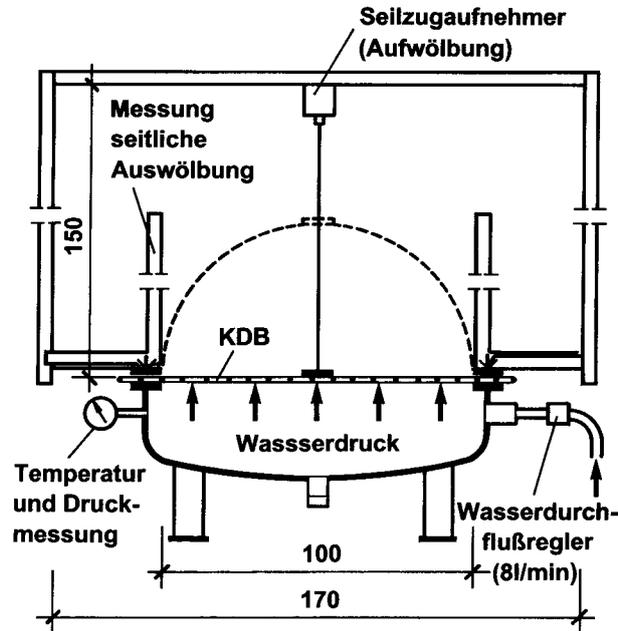


Bild 4.6: Berstdruckversuchseinrichtung

4.2.2 Versuchsbeschreibung

Die Berstdruckversuche wurden mit Hilfe eines Brunnentopfunterteils durchgeführt (Bild 4.6). Die kreisrund zugeschnittene Kunststoffdichtungsbahn wurde an ihrem Rand fest eingespannt. Die Prüf­fläche der Kunststoffdichtungsbahn betrug ca. 7.820 cm² (1000 mm Durchmesser).

Von unten wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 13938-1 durch einen konstanten Wasserzufluss (8 l/min) eine Wasserdruckbelastung auf die Kunststoffdichtungsbahn bis zum Bersten aufgebracht [13]. Der konstante Wasserzufluss in den Brunnentopf wurde durch einen Durchflussmesser und der Wasserdruck unter der aufgewölbten Kunststoffdichtungsbahn durch einen Druckaufnehmer laufend überwacht. Die Aufwölbhöhe der Kunststoffdichtungsbahn wurde kontinuierlich mit einem Seilzugaufnehmer während des Versuches gemessen [6].

Zur Bestimmung der Verformungen und Dehnungen der Kunststoffdichtungsbahn wurden folgende Messungen durchgeführt:

a) Mittlere mehrachsige Dehnung

Zur Bestimmung der mittleren mehrachsigen Dehnung mussten die vertikale Wölbhöhe und in einigen Versuchen zusätzlich auch die seitliche Auswölbung der Kunststoffdichtungsbahn gemessen werden, (Bild 4.6) [6].

b) Einzeldehnungen

Auf die Kunststoffdichtungsbahn wurde ein Raster mit einem Linienabstand von 50 mm aufgezeichnet. Im Bereich des Probenmittelpunktes wurden die größten Dehnungen erwartet. Um diese zu erfassen, wurde mit Hilfe von Maßbändern der Abstand zweier benachbarter Rasterlinien in der Nähe des Mittelpunktes an vier Stellen etwa alle zwei Minuten gemessen. Diese Rastervermessung musste eingestellt werden, wenn die Kunststoffdichtungsbahn sehr stark aufgewölbt war und zu bersten drohte [6].

c) Restdehnungen

Das auf die Kunststoffdichtungsbahn aufgezeichnete Raster mit dem ursprünglichen Linienabstand von 50 mm wurde ca. 30 Minuten nach Versuchsende im verformten Zustand vermessen und die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Restdehnungen der Kunststoffdichtungsbahn anhand der Rasterverformung berechnet. Diese Restdehnungen geben trotz der begonnenen Rückverformung der Kunststoffdichtungsbahn einen Anhaltspunkt über die Verformungsverteilung der Dichtungsbahn im Bruchzustand (Verformung z. B. an den Einspannrändern und in der Mitte der Kunststoffdichtungsbahn).

Mit einem Rechner wurden

- der Wasserzufluss,
- der Wasserdruck und
- die vertikale Wölbhöhe

etwa jede Sekunde erfasst und abgespeichert. Die Messwerte standen somit nach Versuchsende zur weiteren Auswertung zur Verfügung. Die Versuche wurden bei einer Wassertemperatur von ca. 20°C durchgeführt.

4.2.3 Versuchsprogramm

Zunächst war vorgesehen, jeweils eine unbeschädigte und eine im Brunnentopfversuch bereits ungefähr gleichstark vorbelastete PE- und PVC-Bahn im Berstdruckversuch einzusetzen. Es wurden deshalb von beiden Bahntypen Kunststoffdichtungsbahnen mit mittleren Eindrückungen von ca. 0,3 mm für die Berstdruckversuche ausgewählt (Versuche Nr. 1 und Nr. 3).

Zuerst wurden die beiden Versuche mit den PVC-Bahnen durchgeführt (Tabelle 4.3). Die Versuche zeigten, dass sich die mittleren Dehnungen beim Bersten der unbeschädigten Bahn und der im Brunnentopfversuch bereits vorbelasteten Bahn nur geringfügig unterschieden. Da dieses Ergebnis auch bei den PE-Bahnen erwartet wurde, war es wenig sinnvoll auch in dieser Versuchsreihe eine nicht im Brunnentopfversuch vorbelastete Kunststoffdichtungsbahn einzusetzen. Aus Vergleichsgründen mit der PVC-Bahn wurde daher zunächst die PE-Bahn mit mittleren Eindrückungen von ca. 0,3 mm im Berstdruckversuch geprüft. Die in die-

sem Versuch ermittelten mittleren Dehnungen beim Bersten bestätigen, durch den Vergleich der Dehnungen von unbeschädigten Kunststoffdichtungsbahnen aus einem anderen Vorhaben [6], dass sich die mittleren Berstdehnungen in beiden Fällen nur wenig unterscheiden. Ein Vergleichsversuch mit einer unbeschädigten PE-Bahn war daher nicht sinnvoll. Es stellte sich jedoch die Frage, ob eine PE-Bahn mit größeren Eindrückungen vorzeitig im Berstdruckversuch versagt. Um dies festzustellen, wurde beschlossen, die PE-Bahn mit mittleren bzw. maximalen Eindrückungen von 0,6 mm bzw. 1 mm im Berstdruckversuch anstelle der unbeschädigten KDB zu prüfen (Tabelle 4.3)

Das aktualisierte Versuchsprogramm der Berstdruckversuche ist Tabelle 4.3 direkt zu entnehmen. Die Eindrückungen in den genannten Kunststoffdichtungsbahnen der Berstdruckversuche Nr. 1, Nr. 3 und Nr. 4 waren durch die vorangegangenen Brunnentopfversuche Nr. 9, Nr. 1 und Nr. 7 verursacht worden (Tabelle 4.1).

Nr.	Kunststoffdichtungsbahn		Bemerkung
	Material	Dicke [mm]	
1	KDB3-PVC-3	3	Beschädigte Bahn aus Brunnentopfversuch Nr. 9 mit vorhandenen mittleren bzw. maximalen Eindrückungen von ca. 0,3 mm bzw. ca. 0,5 mm
2	KDB3-PVC-3	3	nicht vorbelastete Bahn
3	KDB2-PE-3	3	Beschädigte Bahn, aus Brunnentopfversuch Nr. 1 mit vorhandenen mittleren bzw. maximalen Eindrückungen von ca. 0,3 mm bzw. ca. 0,4 mm
4	KDB2-PE-3	3	Beschädigte Bahn aus Brunnentopfversuch Nr. 7 mit vorhandenen mittleren bzw. maximalen Eindrückungen von ca. 0,6 mm bzw. ca. 1,0 mm

Tab. 4.3: Berstdruckversuchsprogramm

4.2.4 Bestimmung der mittleren mehrachsigen Dehnungen

Die mittlere mehrachsige Dehnung wird über die Abwicklung der verformten Kunststoffdichtungsbahn berechnet:

$$\varepsilon_m = \frac{l - D}{D} \times 100 [\%]$$

mit

ε_m mittlere mehrachsige Dehnung der Kunststoffdichtungsbahn in %

l Abwicklungslänge der verformten Kunststoffdichtungsbahn in mm

D Durchmesser der unverformten Kunststoffdichtungsbahn

$$D = 1000 \text{ mm}$$

Die unbekannte Abwicklungslänge l der Kunststoffdichtungsbahn zur Berechnung der mittleren mehrachsigen Dehnung wird in Abhängigkeit von der Wölbhöhe und der seitlichen Auswölbung der Kunststoffdichtungsbahn nach folgenden drei unterschiedlichen Ansätzen ermittelt [6]:

(1) Verformungsbild „Halbkugel“

Bei vertikalen Wölbhöhen $h < 500$ mm und keiner seitlichen Auswölbung (Wölbbreite = 0) der Kunststoffdichtungsbahn wird angenommen, dass sich die Dichtungsbahn halbkugelförmig verformt. Die unbekannte Abwicklungslänge l der verformten Kunststoffdichtungsbahn kann über einen Kreisbogen als Funktion der Wölbhöhe h berechnet werden.

(2) Verformungsbild „Ellipsoid“

Ist die Wölbhöhe der Kunststoffdichtungsbahn größer als 500 mm, so entspricht die Verformungsfigur der Kunststoffdichtungsbahn nicht mehr einer Halbkugel, sondern einem Ellipsoid. Hierbei sind folgende zwei Verformungsbilder zu unterscheiden:

a) Verformungsbild „Halbellipsoid“

Wenn sich die Kunststoffdichtungsbahn nur in vertikaler Richtung und nicht zur Seite hin verformt (keine seitliche Auswölbung der Kunststoffdichtungsbahn, Wölbbreite = 0), so wird angenommen, dass die verformte Kunststoffdichtungsbahn im Querschnitt ungefähr einer Ellipsenhälfte entspricht. Die unbekannte Abwicklungslänge l der Kunststoffdichtungsbahn wird über den Umfang einer halben Ellipse als Funktion der Wölbhöhe h berechnet.

b) Verformungsbild „Ellipsoid“

Besteht eine pilzförmige Verformung der Kunststoffdichtungsbahn mit einer Wölbhöhe $h > 500$ mm und einer seitlichen Auswölbung (Wölbbreite > 0), so wird angenommen, dass das Verformungsbild der Kunststoffdichtungsbahn aus mehreren zusammengesetzten Ellipsoidabschnitten besteht. Die Abwicklungslänge der Kunststoffdichtungsbahn zur Berechnung der mittleren mehrachsigen Dehnung wird als Funktion der Wölbhöhe und der seitlichen Auswölbung berechnet.

4.2.5 Bestimmung von Einzeldehnungen

Während des Versuchs wurden im Bereich des Probenmittelpunktes an vier Stellen die verformten Rasterkästchen mit Hilfe von Maßbändern ausgemessen. Unmittelbar nach dem Versuchsende wurden alle verformten Rasterlinien einzeln vermessen und die Einzeldehnungen wie folgt bestimmt:

$$\varepsilon_e = \frac{v - u}{u} \times 100 \text{ [\%]}$$

mit

ε_e mehrachsige Einzeldehnung der Kunststoffdichtungsbahn in %

v Abstand von zwei benachbarten Rasterlinien auf der Kunststoffdichtungsbahn in mm

u Abstand der unverformten Rasterlinien auf der Kunststoffdichtungsbahn

$$u = 50 \text{ mm}$$

Die mehrachsigen Einzeldehnungen im Bereich des Probenmittelpunktes, die während des Versuchs gemessen wurden, geben zum Messzeitpunkt einen Anhaltswert über die maximale mehrachsige Einzeldehnung der Kunststoffdichtungsbahn.

Die nach dem Versuch gemessenen Einzeldehnungen geben Auskunft über die Dehnungsverteilung in der Kunststoffdichtungsbahn (z. B. Dehnungen am Einspannrand und in Probenmitte).

4.2.6 Versuchsergebnisse der Berstdruckversuche

Berstdruckversuche sind Kurzzeitversuche, die etwa 1 Stunde bis 2 Stunden dauern. Die Berstdruckversuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tabelle 4.4):

(1) PVC-Bahnen KDB3-PVC-3

a) Vorverformungen

Die PVC-Bahn von Versuch Nr. 1 (KDB3-PVC-3) wurde im Brunnentopfversuch zuvor belastet und besaß direkt nach der Flächendruckbelastung die eierkartonförmige Form der Abdichtungsrücklage. Einige Monate später, zum Zeitpunkt des Berstdruckversuchs, hatte sich die PVC-Bahn jedoch nahezu vollständig zurückverformt (Foto 9).

b) Beschädigungen durch Brunnentopfversuche

Ebenso wie die Eierkartonstruktur formten sich die Eindrückungen aus den Flächendruckversuchen im Brunnentopf in der PVC-Bahn nahezu vollständig zurück. Beschädigungen in Form von sehr flachen, leichten Eindrückungen blieben jedoch erkennbar.

c) Berstdehnung und -wölbhöhe

Bei den beiden PVC-Bahnen (beschädigt bzw. unbeschädigt, Versuch Nr. 1 bzw. Nr. 2) betrug die Wölbhöhe zum Zeitpunkt des **Berstens** etwa 78 cm. Ein wesentlicher Einfluss durch die Vorbelastung der Kunststoffdichtungsbahn (Versuch Nr. 1) im Vergleich zur unbeschädigten Bahn (Versuch Nr. 2) war nicht erkennbar, insbesondere unter Berücksichtigung der Streuungen der Berstdruckversuchsergebnisse bei PVC-Bahnen von etwa 5 % (Bilder 4.7 und 4.8). Die mittlere Berstwölbhöhe entspricht einer **mittleren Dehnung** der Kunststoffdichtungsbahn beim Bersten von i.M. etwa 114 %. Die **maximalen Einzeldehnungen**, die unmittelbar nach dem Berstdruckversuch im Bereich der Probenmitte gemessen wurden, betragen i.M. ca. 105 %. Da die maximale Einzeldehnung geringer als die mittlere Berstdehnung ist, bedeutet dies, dass sich die PVC-Bahn schon direkt nach dem Bersten zurückverformt hat (Foto 10).

Versuchs Nr.	Kunststoffdichtungsbahn			Bersten			Nach Versuch Einzeldehnung [%]
	Probenbezeichnung	Eindrückungen [mm]		Berstwölbhöhe [cm]	Wölbbreite [cm]	mittlere Dehnung [%]	
		mittlere	max.				
1	KDB3-PVC-3	ca. 0,3	ca. 0,5	76	5	108	92
2	KDB3-PVC-3	0	0	80	8	120	116
3	KDB2-PE-3	ca. 0,3	ca. 0,4	92	17	146	290
4	KDB2-PE-3	ca. 0,6	ca. 1,0	94	18	151	282

Tab. 4.4: Ergebnisse der Berstdruckversuche

Berstdruckversuch Nr. 1

KDB3-PVC-3, beschädigt, mittlere Eindrückungen ca. 0,3 mm

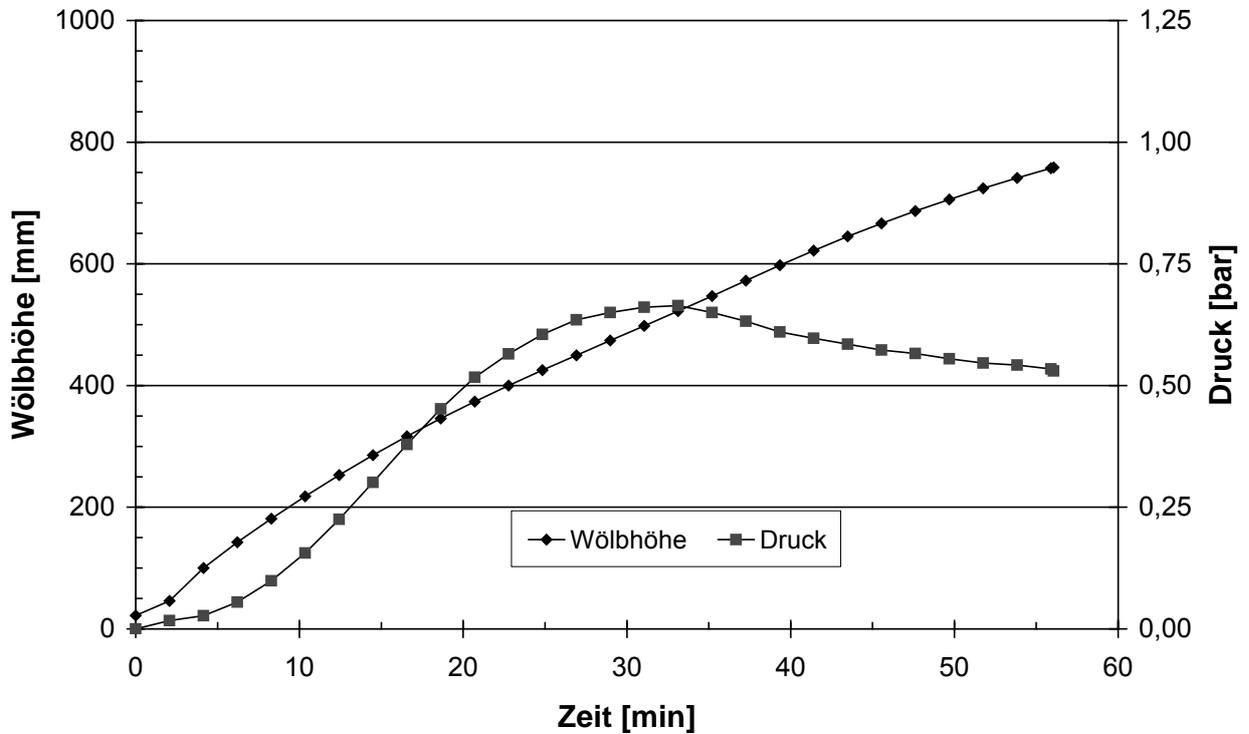


Bild 4.7: Berstdruckversuch Nr. 1

Berstdruckversuch Nr. 2

KDB3-PVC-3, unbeschädigt

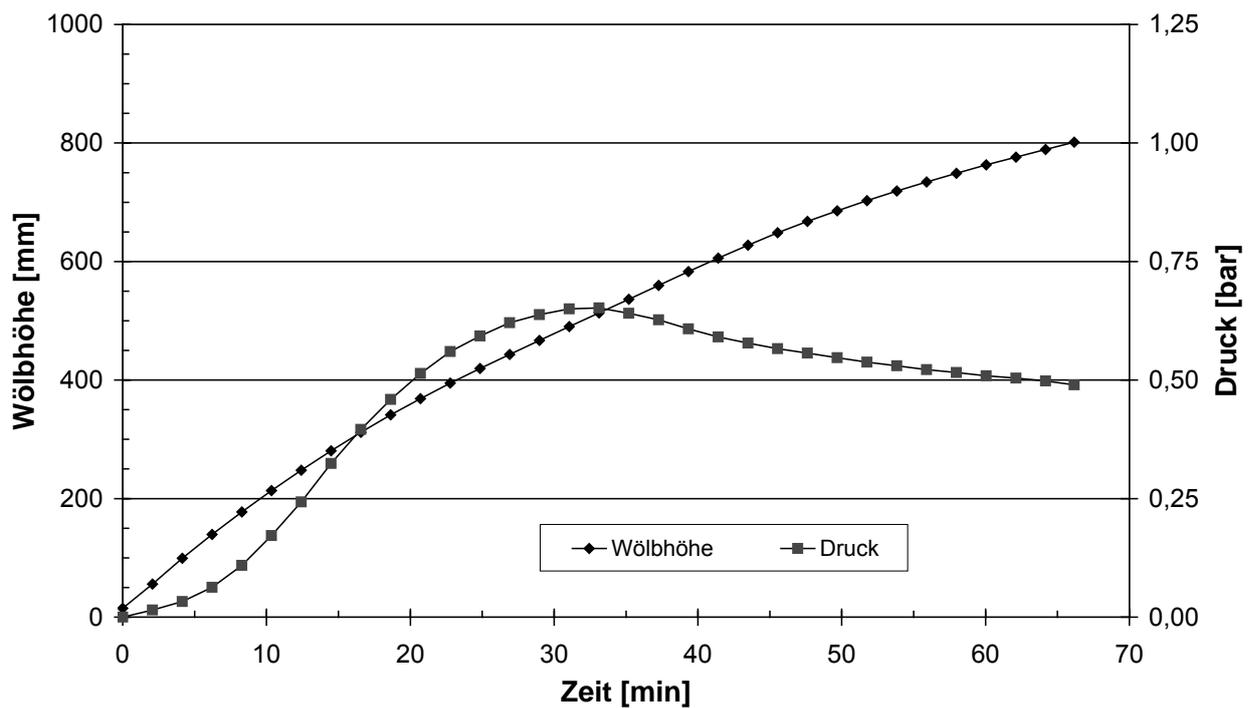


Bild 4.8: Berstdruckversuch Nr. 2

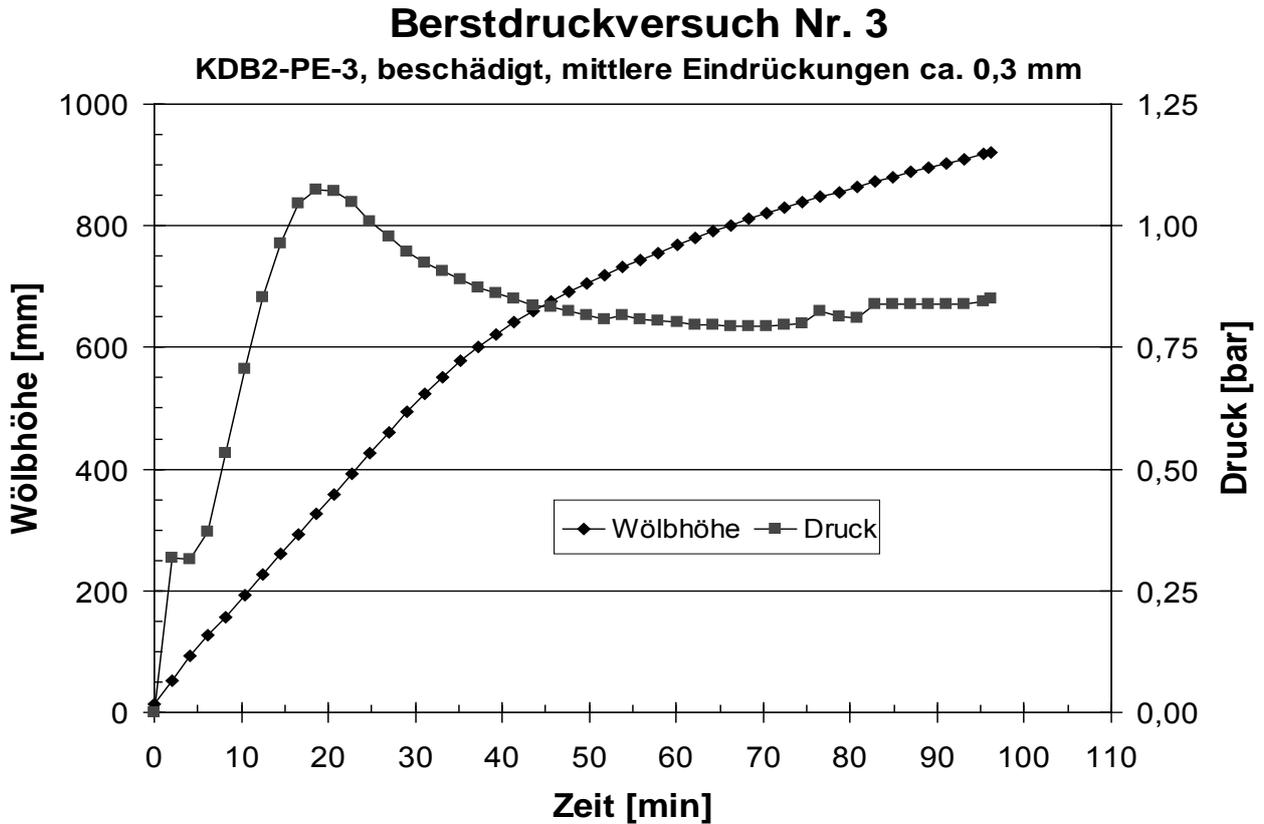


Bild 4.9: Berstdruckversuch Nr. 3

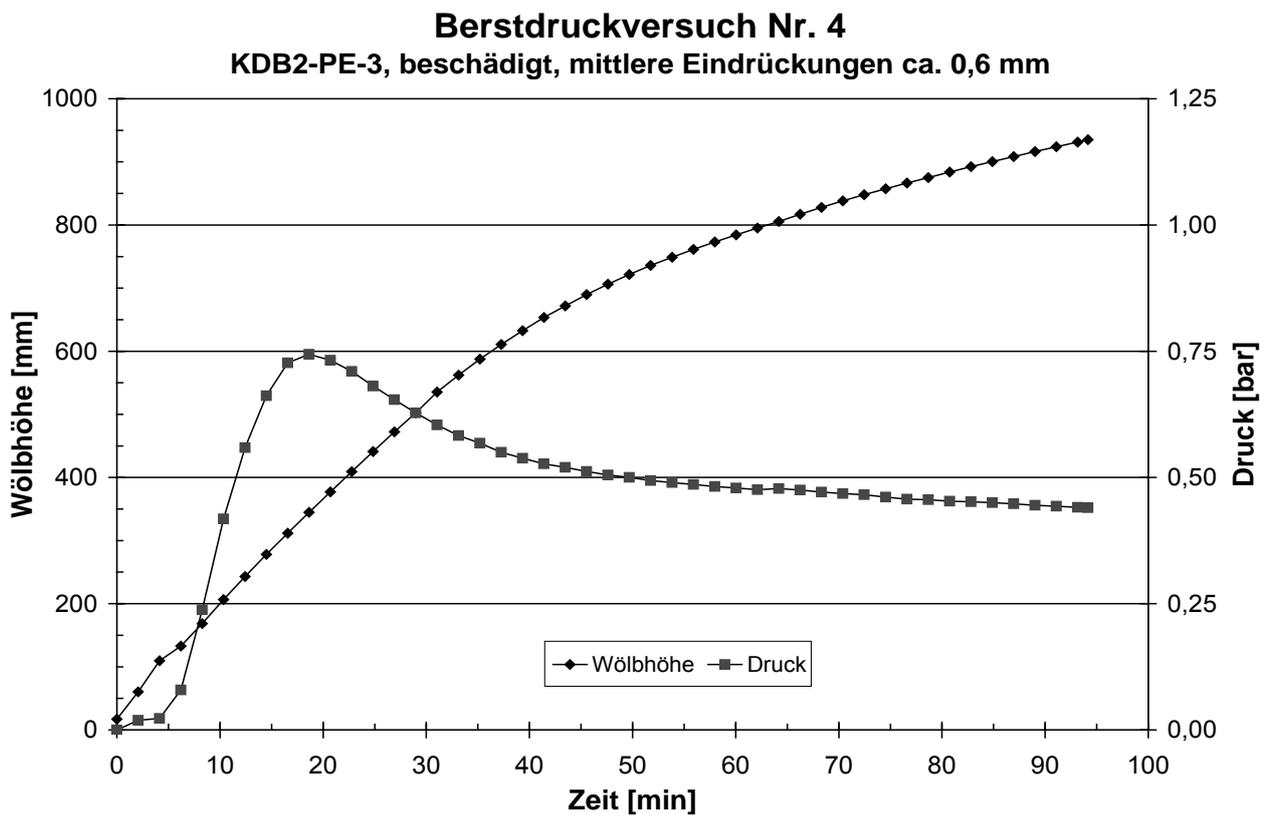


Bild 4.10: Berstdruckversuch Nr. 4

(2) PE-Bahnen KDB2-PE-3

a) Vorverformungen

Die PE-Bahnen (Versuche Nr. 3 und Nr. 4, KDB2-PE3) wiesen durch die einige Monate zuvor mit denselben Bahnen durchgeführten Flächendruckversuche im Brunnentopf nach wie vor eine deutlich erkennbare eierkartonartige Vorverformung auf. Diese Vorverformungen wurden beim Erreichen der Wölbhöhe von etwa 20 cm (etwa nach den ersten 10 Minuten des jeweiligen Berstdruckversuchs) durch die aktuelle Aufwölbung ausgeglichen.

b) Beschädigungen durch Brunnentopfversuche

Die markierten Eindrückungsstellen in der Kunststoffdichtungsbahn durch die spritzbetonraue Abdichtungsrücklage aus dem Flächendruckversuch im Brunnentopf waren zu Berstdruckversuchsbeginn deutlich sichtbar. Da in diesem Bereich starke Verformungsänderungen erwartet wurden, sind auch hier die Einzeldehnungen während des Versuchs gemessen worden. Beispielsweise wurde bei Versuch Nr. 4 etwa 15 Minuten vor dem Bersten an einer ca. 0,8 mm tiefen Eindrückung eine Einzeldehnung von etwa 72 % gemessen. Mit zunehmender Wölbhöhe im Laufe des Berstdruckversuchs nahm die Dicke der Kunststoffdichtungsbahn insgesamt ab. An den Eindrückungsstellen war wider Erwarten keine Vergrößerung der

Eindrückung zu erkennen (Foto 11). Die Eindrückungen waren nicht mehr zu erkennen, sobald die gedehnte Kunststoffdichtung die Dicke der jeweiligen Eindrückung erreichte.

c) Berstdehnung und -wölbhöhe

Bei den beiden PE-Bahnen (KDB2-PE-3) mit mittleren Eindrückungen von ca. 0,3 mm (Versuch Nr. 3) bzw. 0,6 mm (Versuch Nr. 4) betrug die mittlere Dehnung beim Bersten der Kunststoffdichtungsbahn 146 % bzw. 151 %. Die dazugehörige Berstwölbhöhe betrug ungefähr 92 cm bzw. 93 cm (Bilder 4.9 und 4.10). Bei anderen Berstdruckversuchen [6] mit einer zuvor unbelasteten, in etwa vergleichbaren PE-Bahn (Dicke 3 mm, Tabelle 4.5) wurden Wölbhöhen von ca. 99 cm bzw. 107 cm gemessen. Die dazugehörige mittlere mehrachsige Dehnung belief sich auf ca. 180 % bzw. 190 %. Unter Berücksichtigung der üblichen Streuungen in Berstdruckversuchen bei PE-Bahnen von bis zu 15 % stimmen die Versuchsergebnisse relativ gut überein. Ein wesentlicher Einfluss der Eindrückungen in die Kunststoffdichtungsbahn, die durch die Belastung im Flächendruckversuch im Brunnentopf entstanden waren, ist somit bei den geprüften PE-Bahnen im durchgeführten Kurzzeitversuch nicht erkennbar (Foto 12).

Produktbezeichnung	Nenn-dicke	Dicke [mm]	Flächen-gewicht [g/m ²]	Sekantenmodul [N/mm ²]		Reißfestigkeit [N/mm ²]		Reißdehnung [%]	
				längs	quer	längs	quer	längs	quer
KDB2-PE-3	3 mm	3,30	3.203	103,7	101,1	27,5	30,2	840	882
PE-Vergleich ¹⁾	3 mm	3,37	3.123	92,2	103,0	25,7	30,7	753	831

¹⁾ Vergleichbare PE-Bahn (TPO-2-D3) aus [6]

Tab. 4.5: Materialeigenschaften der vergleichbaren PE-Bahnen (Werte vom Süddeutschen Kunststoffzentrum ermittelt)

(3) Vergleich von PE-Bahnen und PVC-Bahnen

a) Berstdehnung und Wölbhöhe

Die mittlere Berstwölbhöhe der beiden PVC-Bahnen war mit etwa 78 cm kleiner als die der PE-Bahnen mit ca. 93 cm. Die geringeren Berstwölbhöhen von PVC-Bahnen im Vergleich zu denen von PE-Bahnen wurden auch in anderen Untersuchungen bereits festgestellt [6]. Entsprechend den geringeren Berstwölbhöhen bei den PVC-Bahnen waren auch die mittleren mehrachsigen Berstdehnungen mit etwa 114 % kleiner als bei den PE-Bahnen (ca. 150 %).

b) Rückverformung

Die mittlere Dehnung der PE-Bahnen beim Bersten war im Mittel etwa um 35 % größer als bei den PVC-Bahnen. Die maximalen Einzeldehnungen in Probenmitte, die unmittelbar nach dem Versuch gemessen wurden, waren bei den PE-Bahnen ungefähr um 175 % größer als bei den PVC-Bahnen. Ferner betrug die Dicke der PE-Bahnen in Probenmitte nur etwa 0,3 mm (Ausgangsdicke 3 mm), während hier die PVC-Bahnen fast wieder ihre Ausgangsdicke besaßen. Dies deutet daraufhin, dass sich die PVC-Bahnen unmittelbar nach der Belastung stärker zurückverformen als die PE-Bahnen.

4.2.7 Zusammenfassung der Berstdruckversuche

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass nur ein geringer Unterschied zwischen den Dehnungen beim Bersten von vorbelasteten (im Flächendruckversuch) und unbeschädigten Kunststoffdichtungsbahnen bei PVC- und PE-Bahnen in den durchgeführten Berstdruckversuchen (Kurzzeitversuche) festgestellt wurden. Es wurden mittlere mehrachsige Bruchdehnungen bei den vorbelasteten bzw. unbeschädigten Kunststoffdichtungsbahnen aus PVC-P (KDB3-PVC-3) von etwa 108 % bzw.

120 % (Berstwölbhöhe ca. 76 cm bzw. 80 cm) und aus PE (KDB2-PE-3) von etwa 150 % bzw. 185 % (Berstwölbhöhe ca. 93 cm bzw. 103 cm) festgestellt. Wenn man die üblichen Streuungen der Berstdehnungen bei PVC- und PE-Bahnen von bis zu 15 % berücksichtigt, haben die Eindrücke in die Kunststoffdichtungsbahn im Kurzzeit-Berstdruckversuch keinen wesentlichen Einfluss auf die möglichen Berstdehnungen. Dies bedeutet, dass bei mehrachsigen Zugbeanspruchungen wie im Berstdruckversuch andere Verhältnisse vorliegen als beim einachsigen Zugversuch. Aus den Erfahrungen aus der Prüfpraxis ist hingegen bekannt, dass im einachsigen Zugversuch Beschädigungen in der Kunststoffdichtungsbahn einen Einfluss auf die Größe der Reißdehnung haben.

5 Tunnelbautechnische Bewertung

5.1 Allgemeines

Zur Reduzierung der mechanischen Beanspruchungen einer Kunststoffdichtungsbahn ist der Einsatz einer gebirgsseitigen Schutzschicht (z.B. aus Vliesstoffen) in den einschlägigen Regelwerken [8,9] vorgeschrieben. Nach derzeitigem Diskussionsstand in den Arbeitskreisen wird aufgrund der gesammelten Erfahrungen voraussichtlich die Mindest-geotextilmasse in der neuen ZTV-Tunnel für die geotextile Schutzschicht mit einem Mittelwert minus Standardabweichung von ≥ 900 und $< 1.200 \text{ g/m}^2$ angegeben. Deshalb sollten die geotextilen Schutzschichten in diesen Versuchsreihen generell eine Nennmasse von 1.000 g/m^2 besitzen. Ferner muss die Dicke der Kunststoffdichtungsbahn mindestens 2 mm, bei wasserdruckhaltender Abdichtung mindestens 3 mm betragen.

Aufgrund der hier durchgeführten Versuche wird empfohlen, in die maßgebenden Regelwerke zwei unterschiedliche Versuchstypen als Schutzwirkungsnachweise aufzunehmen, nämlich Zeitstanddruckversuche mit Pyramidenstempel als „Indextests“ und Flächendruckversuche im Brunnenkopf als „Anwendungstechnische Tests“. Die Zeitstandversuche mit Pyramidenstempel eignen sich

aufgrund des geringeren Aufwands für Versuchsserien mit größerer Variation der Prüfandbedingungen und Prüfmaterialien. Die Flächendruckversuche im Brunnentopf sind aufwendiger, bilden aber die Situation im Tunnel realistischer nach. Sowohl bei Indextests als auch bei den anwendungstechnischen Versuchen sollen Schutzschichten nur in Verbindung mit der vorgesehenen Kunststoffdichtungsbahn getestet werden, da das Prüfergebnis stark von der verwendeten Kunststoffdichtungsbahn abhängt.

5.2 Tunnelbautechnische Bewertung aufgrund der Indexversuche

Aus den Versuchsergebnissen der Indexversuche (Kap. 3) können folgende Hinweise für den Tunnelbau gegeben werden:

(1) Zugversuche und Indexversuche

Die Zugfestigkeiten haben im Hinblick auf die Schutzwirksamkeit, wie die Untersuchungsergebnisse in Kap. 3 zeigen, nicht den bisher angenommenen Stellenwert. Eine ausreichend große Masse ist entscheidend. Die Variation der Geotextiltypen, z.B. hinsichtlich der Faser- und Gewebeatart, ist für die Beanspruchungen der Dichtungsbahnen weniger relevant als der Einfluss des Dichtungsbahnmaterials selbst.

In den EDT [14] werden Anforderungen an die Höchstzugkräfte, die Stempeldurchdrückkräfte und die zugehörigen Verformungen der geotextilen Schutzschichten gestellt. Ein in diesem Vorhaben untersuchtes Geotextil erfüllte die Anforderungen nicht vollständig, was sich aber im Vergleich zu den übrigen Geotextilien in den Versuchen zur Untersuchung der Schutzwirksamkeit nicht negativ auswirkte. Es wird daher empfohlen, die Anforderungen an die Festigkeiten der Geotextilien bei der Überarbeitung der Regelwerke unter Berücksichtigung der nun zur Verfügung stehenden Untersuchungsergebnisse zu modifizieren. Bei der Modifizierung sollte zudem berücksichtigt werden, dass in der Tunnelbaupraxis die Verformungen erheblich kleiner sind als die Verformungen bei den Höchstzug- und

Stempeldurchdrückkräften im Zug- und Stempeldurchdrückversuch.

(2) Vergleich von Durchdrück- und Zeitstandversuchen

Die Zeitstandversuche mit Pyramidenstempel erfassen den kritischen Beanspruchungsfall und die maßgebenden Materialunterschiede im Vergleich zu den Flächendruckversuchen im Brunnentopf besser als die weggesteuerten Durchdrückversuche. Für Dränmatten ergaben sich allerdings im Zeitstandversuch im Vergleich zum Flächendruckversuch zu ungünstige Beanspruchungen.

(3) Zeitstandversuche mit Pyramidenstempel

Die Größe der Druckkraft in den Zeitstandversuchen mit Pyramidenstempel sollte so vorgegeben werden, dass die Eindrückungen der Kunststoffdichtungsbahnen im gleichen Bereich liegen wie in den Flächendruckversuchen im Brunnentopf. Die in Kap. 3 für die Zeitstandversuche gewählte Last von 625 N führte bei gleichen Prüfmaterialien zu größeren Eindrückungen als in den Flächendruckversuchen im Brunnentopf. Daher sollte in weiteren Versuchen die erforderliche niedrigere Last bestimmt werden.

5.3 Tunnelbautechnische Bewertung aufgrund der Flächendruckversuche

Die Flächendruckversuche ergaben folgende Erkenntnisse für den Tunnelbau:

(1) Verlegung der Kunststoffdichtungsbahn ohne Schutzschicht

Kunststoffdichtungsbahnen können, wenn sie ohne geotextile Schutzschicht im Tunnelbau verlegt werden, tiefe Eindrückungen erhalten oder sogar perforiert werden (vgl. Kapitel 4.1.3, Punkt (1)). Ob eine derartig geschädigte Kunststoffdichtungsbahn über längere Zeiträume (z.B. 100 Jahre) einer Wasserdruckbelastung standhält, ist fraglich.

Aufgrund der Ergebnisse der hier durchgeführten Flächendruckversuche mit PVC- und PE-Bahnen können neuere Vorschläge, ins-

besondere aus Kostengründen auf die geotextile Schutzschicht ganz zu verzichten, nicht befürwortet werden.

- (2) Verlegung der Kunststoffdichtungsbahn mit geotextiler Schutzschicht

Durch eine geotextile Schutzschicht aus Faservliesstoff ($g=1000 \text{ g/m}^2$) wurde die Kunststoffdichtungsbahn vor starken Eindrückungen, wie sie bei fehlender Schutzschicht auftraten, geschützt (vgl. Kapitel 4.1.3, Punkte (2) bis (4)). Geotextile Schutzschichten sollten deshalb angeordnet werden und eine Nennmasse von 1000 g/m^2 besitzen. Vorzugsweise sollten die geotextilen Schutzschichten mit einer wasserseitigen Gewebeauflage versehen sein. Eine Durchfeuchtung des Endlosfaservliesstoffes hat keinen Einfluss auf den Beschädigungsgrad der Kunststoffdichtungsbahn.

Durch die Verwendung von Geotextilien mit höheren Massen lässt sich der mögliche Beschädigungsgrad der Kunststoffdichtungsbahn noch weiter verringern [2]. Bei einer doppellagigen Abdichtung und der Verwendung von dicken Geotextilien besteht jedoch die Gefahr, dass aufgrund der größeren Zusammendrückbarkeit der Schutzschicht die Nähte der Dichtungskissen beim Injizieren stärker aufgeweitet werden und durch diesen Schälleffekt reißen können. Deshalb ist es empfehlenswert, eine höhere Schutzwirksamkeit von Geotextilien nicht nur durch eine größere Nennmasse zu erreichen, sondern beispielsweise auch geeignete geotextile Verbundstoffe einzusetzen, die eine etwas höhere Schutzwirksamkeit als Geotextilien nur aus Faservliesstoffen bieten.

- (3) Verlegung der Kunststoffdichtungsbahn auf Dränmatten

Dränmatten können eine gewisse Schutzwirksamkeit besitzen, obwohl sie in erster Linie für die Drainage konzipiert sind. Je nach Ausbildung der Dränmatte kann es jedoch unter Umständen zu scharfkantigen Verformungen der Dränmatte kommen. Die scharfen Kanten der Dränmatte können die

Kunststoffdichtungsbahn dann so belasten, dass es zu starken Eindrückungen oder sogar zu Perforationen kommen kann. Deshalb sollten Dränmatten luftseitig mit einem Schutzvlies (mind. Robustheitsgrad 4) versehen werden. Bei Hohlrippenelementen sollte die Trägerbahn eine Grundstärke von $> 0,8 \text{ mm}$ bzw. ein Flächengewicht von mindestens 800 g/m^2 aufweisen. Durch diese Maßnahmen können solche Beschädigungen der Kunststoffdichtungsbahn sicher ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 4.1.3, Punkt (5)).

6 Aufnahme der Versuche in die Regelwerke

Folgende Erkenntnisse aus Indextests und anwendungstechnischen Versuchen sollten beispielsweise Berücksichtigung bei der Überarbeitung der Regelwerke finden:

- (1) Indexversuche

Für die Aufnahme von Indexversuchen in die Regelwerke werden Zeitstandversuche mit Pyramidenstempel mit Druck- oder mit kombinierter Druck- und Dehnungsbeanspruchung vorgeschlagen. Diese Indexversuche eignen sich jedoch nur bedingt für Dränmatten. Da die Relationen der Ergebnisse der Zeitstandversuche mit Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien gut mit den Ergebnissen der Flächendruckversuche im Brunnenkopf übereinstimmen, sollten die gleichen Bewertungskriterien verwendet werden (vgl. Punkt (2)). Die absoluten Größen der Restdicken der Dichtungsbahnen waren allerdings für die gewählte Druckkraft von 625 N in den Zeitstandversuchen kleiner als in den Flächendruckversuchen im Brunnenkopf. Zur Angleichung sollte daher eine geringere Druckkraft gewählt werden.

- (2) Flächendruckversuche im Brunnenkopf

Abdichtungspakete für Tunnelabdichtungen, bestehend aus Schutzschicht und Kunststoffdichtungsbahn, sollten vor einem erstmaligen Einsatz durch einen Flächendruck-

versuch im Brunnentopf im Hinblick auf ihre Eignung geprüft werden. Die Beurteilung der Ergebnisse der Flächendruckversuche kann mit Hilfe der Restdicke der Kunststoffdichtungsbahn erfolgen, so dass beispielsweise folgende Forderungen erfüllt sein müssen:

- a) Die Schutzschicht darf die Kunststoffdichtungsbahn auch bei starker Verformung nicht beschädigen (z.B. keine scharfen Kanten)
 - b) Die mittlere Eindrücktiefe darf nicht mehr als 0,3 mm betragen.
 - c) Die maximal zulässige Eindrücktiefe darf nicht mehr als 0,4 mm betragen.
- (3) Berstdruckversuche

In den „EDT-Empfehlungen“ [14] ist der Berstdruckversuch zur Beurteilung des mehrachsigen Dehnungsverhaltens von Kunststoffdichtungsbahnen im Anlieferungszustand vorgesehen. Aufgrund der Berstdruckversuchsergebnisse der STUVA (vgl. Kapitel 4.2.6 und [6]) sollte der Wert für die mehraxiale Dehnung im Berstdruckversuch für den Anlieferungszustand der Kunststoffdichtungsbahn von 40 % auf beispielsweise 70 % angehoben werden. Zu beachten ist, dass in den Berstdruckversuchen entsprechend den „EDT-Empfehlungen“ keine vorgeschädigte Kunststoffdichtungsbahn eingesetzt und der Berstdruckversuch als Kurzzeitversuch durchgeführt wird. Die oben genannte Emp-

fehlung kann daher nicht direkt auf im Tunnelbau bereits eingebaute Kunststoffdichtungsbahnen übertragen werden. Hierzu sind spezielle Versuchsreihen erforderlich, in denen das Langzeitverhalten von mechanisch beschädigten Kunststoffdichtungsbahnen unter mehrachsiger Dehnungsbeanspruchung untersucht wird.

7 Ausblick

Die aufgeworfenen Probleme hinsichtlich des Langzeitverhaltens von Kunststoffdichtungsbahnen mit mechanischen Beschädigungen bei mehrachsiger Dehnung sollten unbedingt geklärt werden. Diese Erkenntnisse und die Ergebnisse aus dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben sollten bei der Neufassung von Regelwerken Berücksichtigung finden.

Im Hinblick auf das Langzeitverhalten von Verbundstoffen ist die Gewebekomponente, die über die Aktivierung von Zugkräften wirkt, kritischer als die Vliesstoffkomponente einzustufen. Wenn die Beständigkeit des Gewebes nicht über die gesamte Nutzungsdauer des Tunnels sicher vorhergesagt werden kann, sollten Schutzwirksamkeitsnachweise möglicherweise ohne die Gewebekomponente durchgeführt werden.

Darüber hinaus muss für die vorgeschlagenen Prüfverfahren, die in die Regelwerke aufgenommen werden sollen, eine verbindliche Prüfvorschrift erarbeitet werden.

8 Literatur

- [1] Haack, A.: Tunnelbau in Deutschland: Statistik (1999/2000), Analyse und Ausblick, Tunnel 6/2000
- [2] "Untersuchung der Schutzwirksamkeit von Geotextilien bei Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen", Abschlussbericht des Forschungsvorhabens FE 89.029/1997/B3 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Universität Hannover und STUVA, 1999
- [3] DIN EN ISO 1133: Kunststoffe – Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten, Februar 2000
- [4] DIN EN ISO 10319: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Zugversuch am breiten Streifen, Juni 1996
- [5] DIN EN ISO 12236: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Stempeldurchdruckversuch (CBR-Versuch), April 1996
- [6] „Anforderungen und Prüfungen an einlagigen Kunststoffdichtungsbahnen für die Abdichtung von Straßentunneln, einschließlich der Erarbeitung von normativen Empfehlungen, Teil Brunnentopf- und Berstdruckversuche“, Abschlussbericht des Forschungsvorhabens FE 15.01/1998/ERB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), STUVA, November 2000
- [7] "Experimentelle Untersuchungen von Tunnelabdichtungen", Abschlussbericht, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen (STUVA), 1987
- [8] RIL 853: "Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten", Deutsche Bundesbahn 1998
- [9] ZTV-Tunnel, Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln, Teil 1, Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise); Bundesministerium für Verkehr (Abt. Straßenbau), 1995
- [10] ÖNORM S 2076: Deponien: Dichtungsbahnen aus Kunststoff - Verlegung, 1993
- [11] "Neue Verfahren zur geomechanischen Prüfung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen", STUVA Forschungsbericht 22/ 89, Köln, 1989
- [12] "Experimentelle Untersuchungen zum geomechanischen Verhalten von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen", STUVA Forschungsbericht 27/ 91, Köln, 1991
- [13] DIN EN ISO 13938, Teil 1: Bersteigenschaften von textilen Flächengebilden; Teil 1: Hydraulisches Verfahren zur Bestimmung von Berstdruck und Berstwölbung, Deutsches Institut für Normung e. V., Oktober 1999
- [14] "Empfehlungen Doppeldichtung Tunnel-EDT", Hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Berlin, Ernst & Sohn, 1997

9 Fotodokumentation

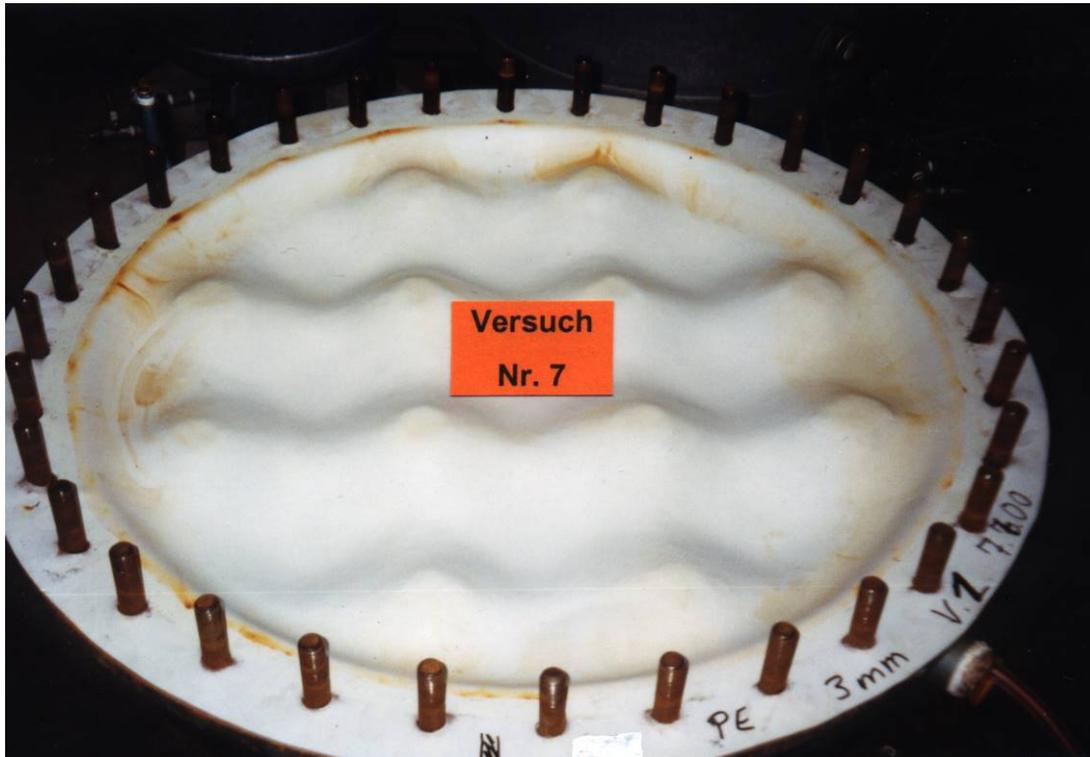


Foto 1: Verformte PE-Bahn (KDB2-PE-3) nach dem Flächendruckversuch (Versuch Nr. 7)

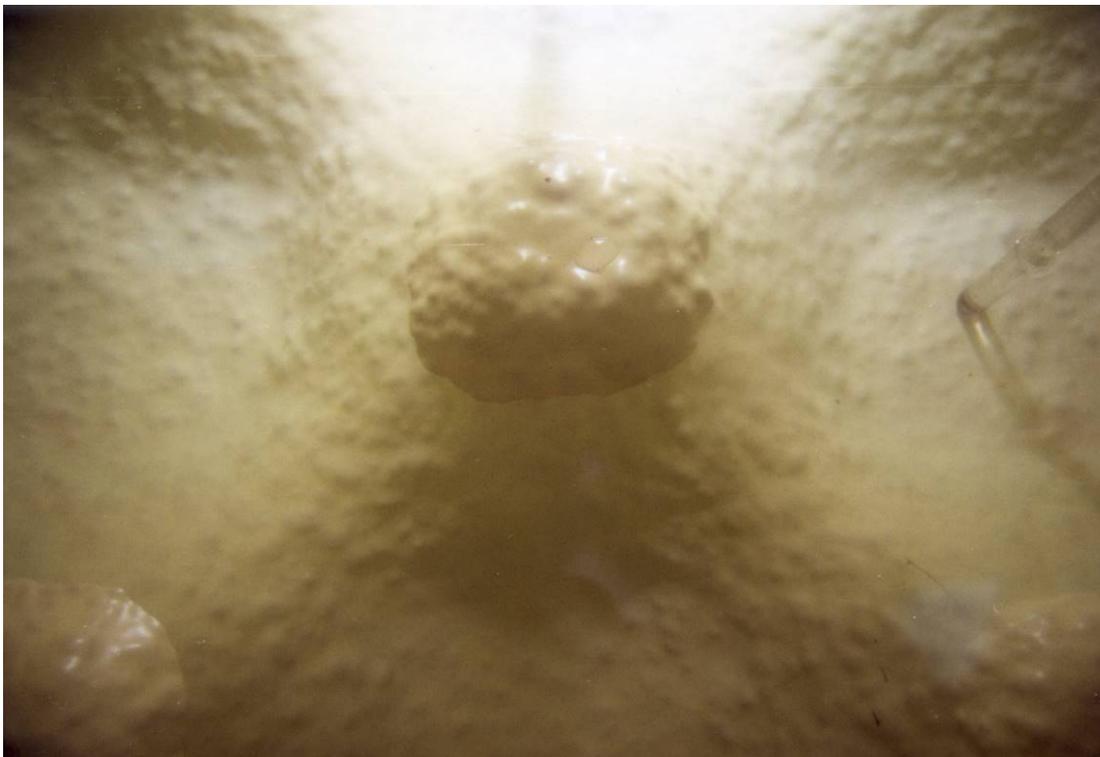


Foto 2: Verformte PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) während des Flächendruckversuches ohne Schutzschicht (Versuch Nr. 8). Deutlich ist die Oberflächenstruktur der spritzbetonrauen Abdichtungsrücklage an der PVC-Bahn zu erkennen.



Foto 3: Perforation in der PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) (Blick auf die Signalschicht) nach dem Flächendruckversuch ohne Schutzschicht (Versuch Nr. 8)

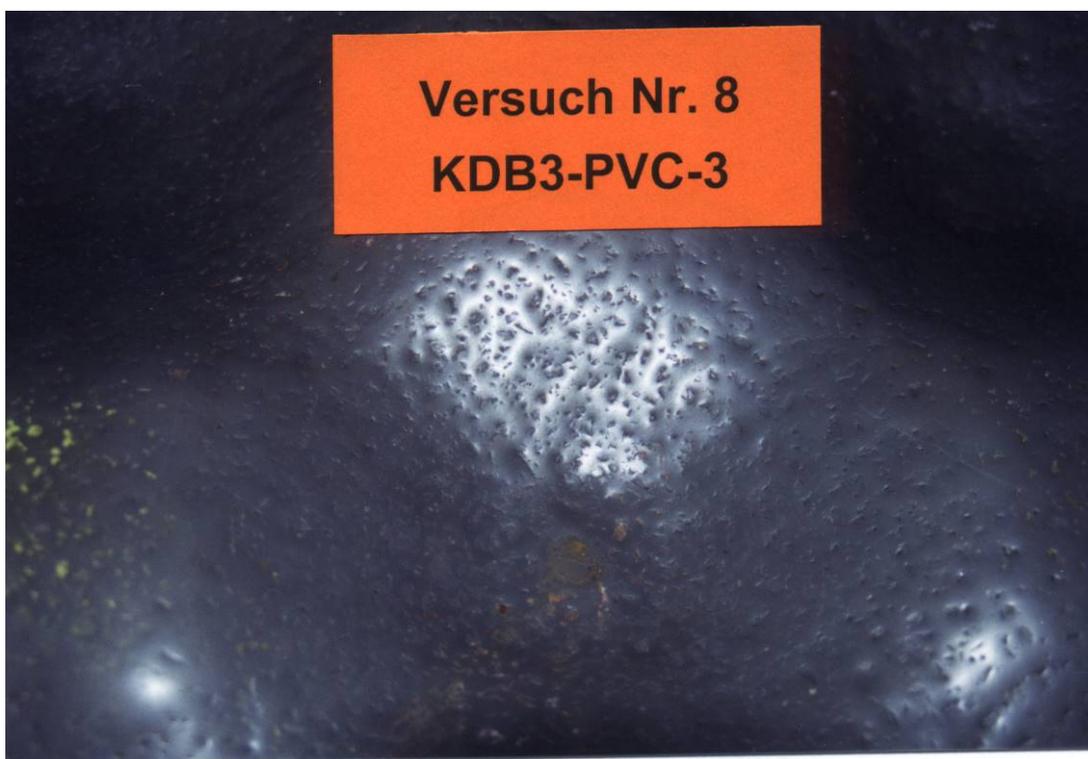


Foto 4: Eindrückungen der Splittkörner der Rücklage in die PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) (Blick auf die gebirgsseitige Seite) nach dem Flächendruckversuch ohne Schutzschicht (Versuch Nr. 8)



Foto 5: Verformte PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) mit Eindrückungen nach dem Flächendruckversuch ohne Schutzschicht (Versuch Nr. 8)

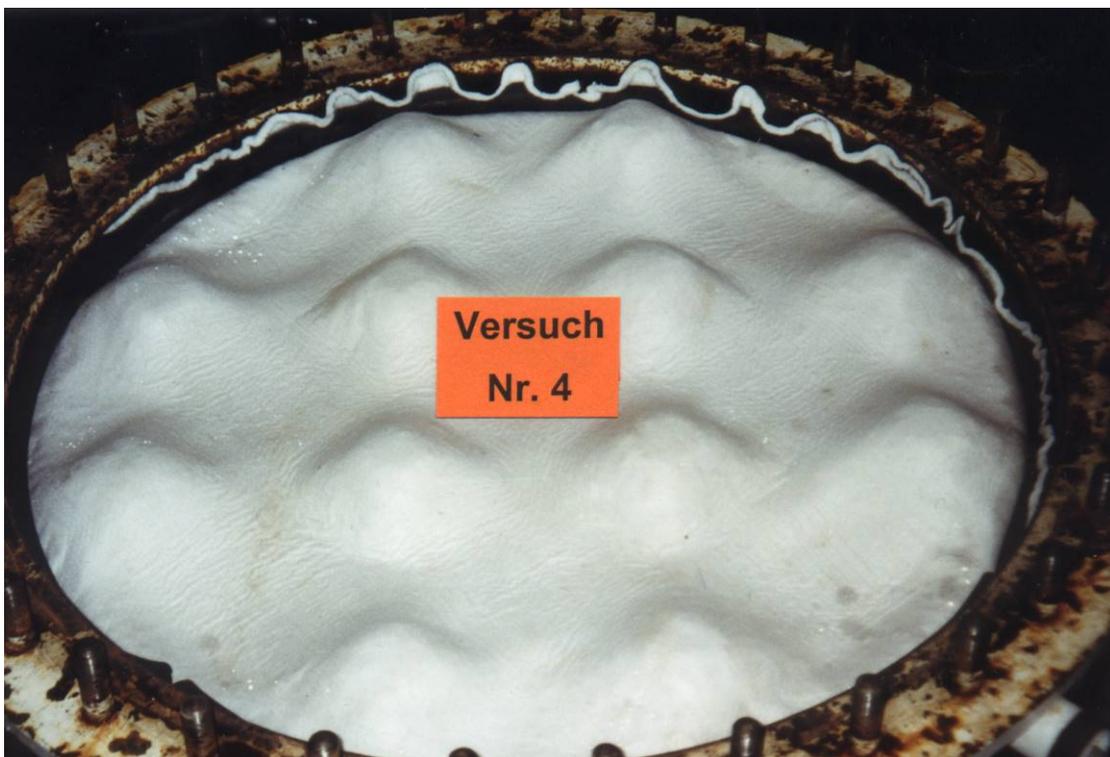


Foto 6: Verformte geotextile Schutzschicht (Verbundstoff: GT1-S+MG-PP-1000) (Versuch Nr. 4)

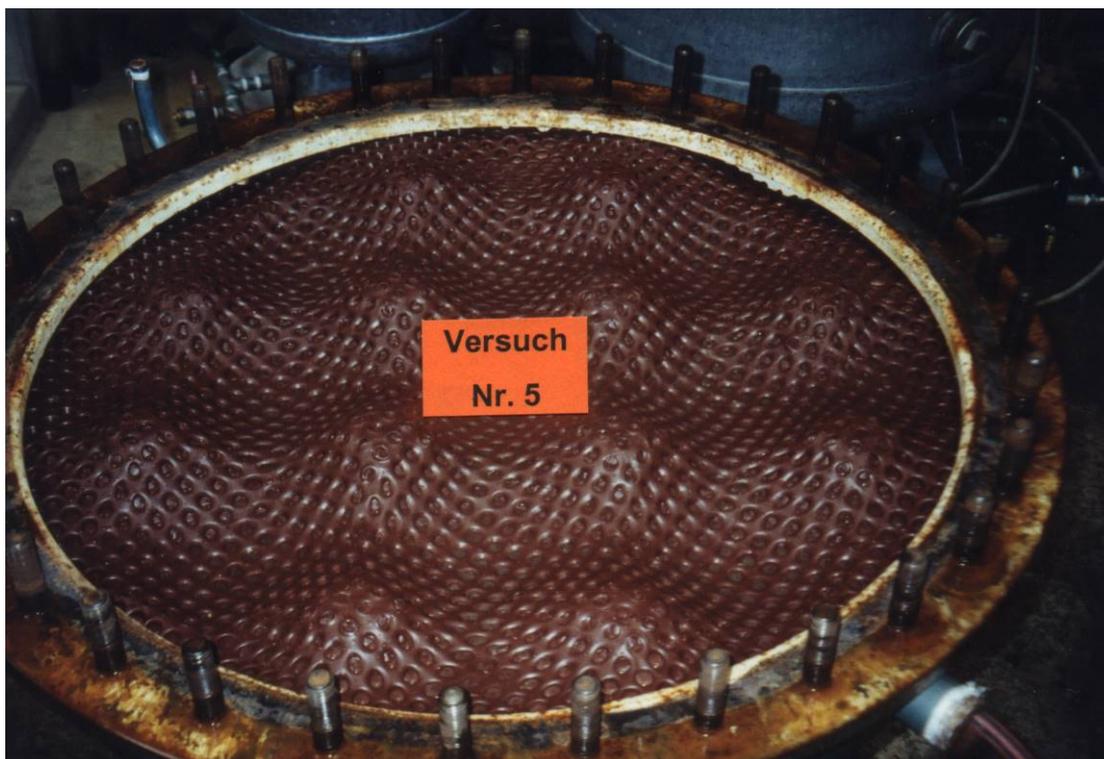


Foto 7: Verformte Dränmatte mit Noppen (DM1-PEHD) (Versuch Nr. 5) nach der Flächendruckbelastung



Foto 8: Verformte Dränmatte mit Wirrgelege und Vlieskaschierung (DM2-PP) (Versuch Nr. 6) nach der Flächendruckbelastung

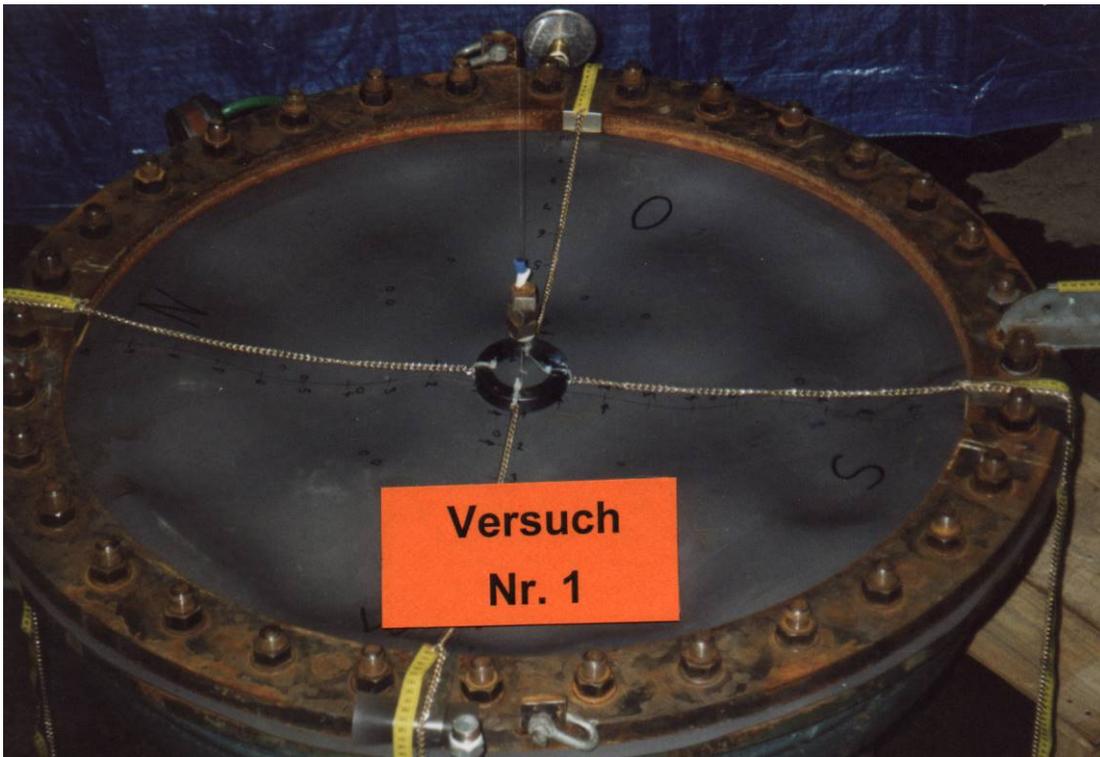


Foto 9: Im Flächendruckversuch vorbelastete PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) eingeflanscht für den Berstdruckversuch mit Messtechnik (Berstdruck-Versuch Nr. 1)



Foto 10: Geborstene PVC-Bahn (KDB3-PVC-3) (Berstdruck-Versuch Nr. 1)

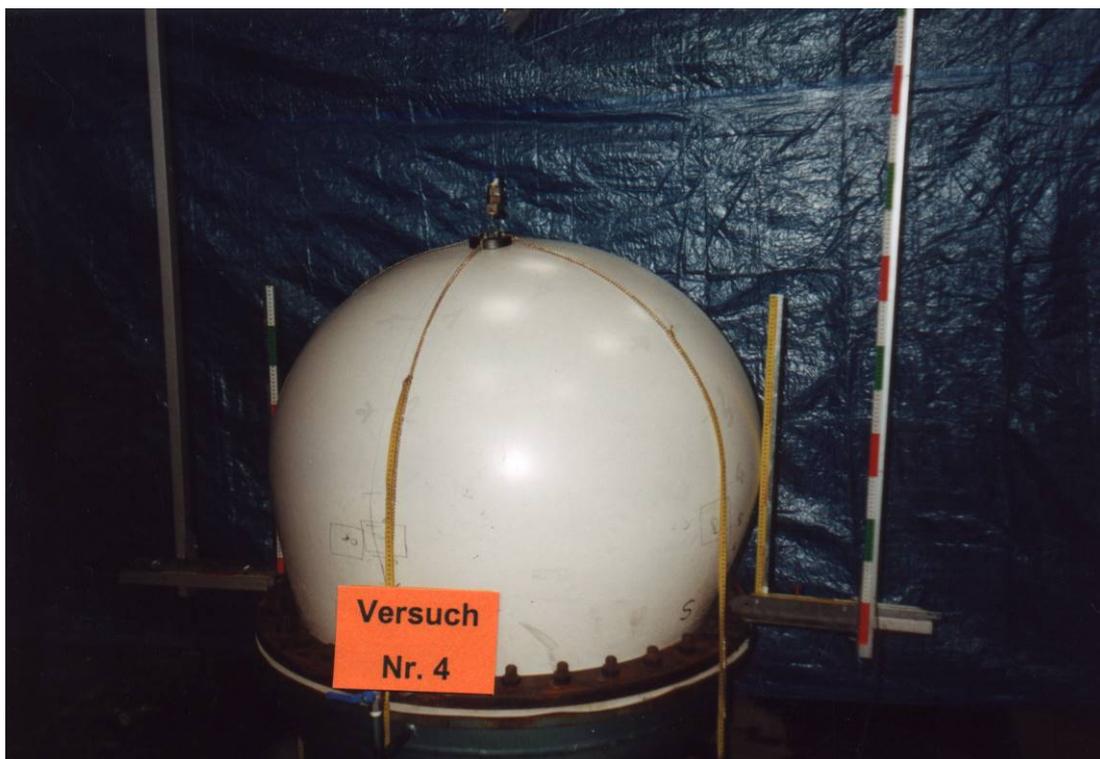


Foto 11: Aufgewölbte PE-Bahn (KDB2-PE-3) (Berstdruck-Versuch Nr. 4) einige Minuten vor dem Bersten

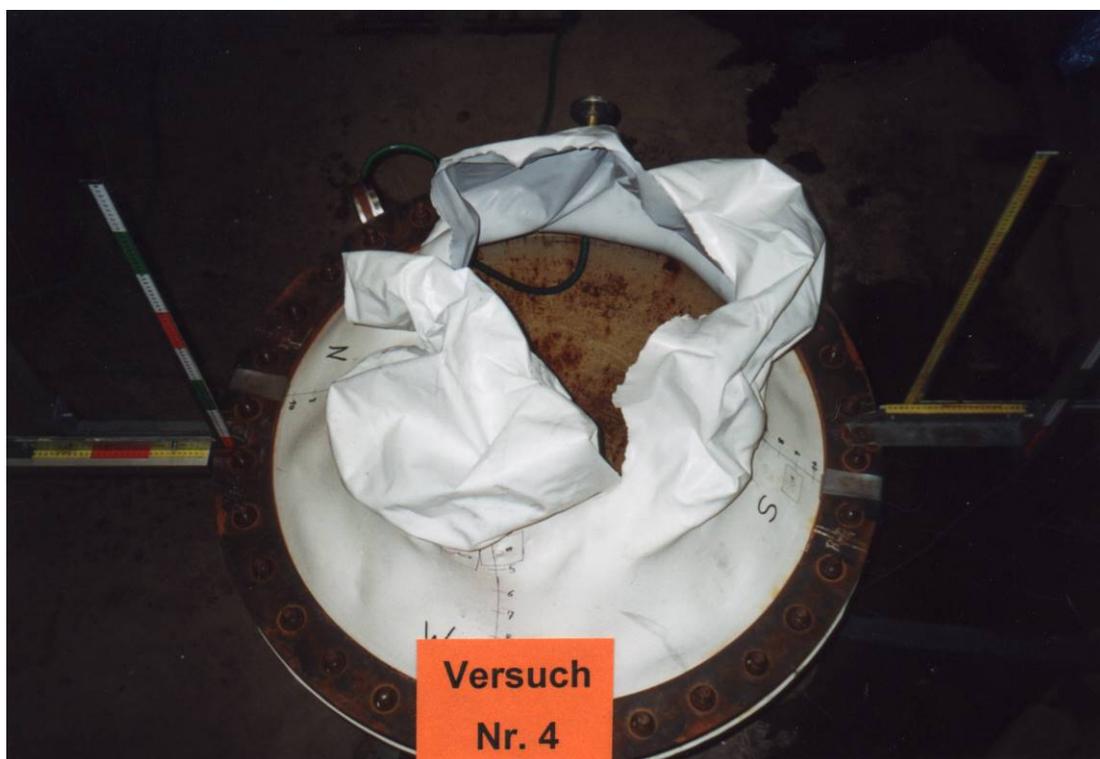


Foto 12: Geborstene PE-Bahn (KDB2-PE-3) (Berstdruck-Versuch Nr. 4)

