

**UNIVERSITÄT HANNOVER**  
Institut für Grundbau, Bodenmechanik  
und Energiewasserbau (IGBE)

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

**Abschließender Sachbericht zum Forschungsvorhaben**

**FE 89.029/1997/B3**

# **Untersuchung der Schutzwirksamkeit von Geotextilien bei Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen**

**im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Hannover und Köln, 1999**



**Bibliothek BAST**

20000046886



**Durchführende Institutionen:**

- Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover

und

- STUVA e.V. Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Mathias-Brüggen-Str. 41, D-50827 Köln

Bearbeitung durch:

- Dr.-Ing. Katrin Brummermann, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung (vormals IGBE), Universität Hannover
- Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel, IGBE, Universität Hannover
- Prof. Dr.-Ing. Alfred Haack, STUVA, Köln
- Dr.-Ing. J. Schreyer, STUVAtec GmbH, Köln
- Dipl.-Ing. Sylvia Beyer, STUVAtec GmbH, Köln

**Auftraggeber:**

Bundesanstalt für Straßenwesen, Brüderstr. 53, D-51427 Bergisch Gladbach



<b>Inhalt</b>		5.4 Versuchsergebnisse	16
		5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse	18
<b>1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>7</b>	<b>6 GESAMTBEWERTUNG, EMPFEHLUNGEN UND AUSBLICK</b>	<b>19</b>
<b>2 STAND DER KENNTNISSE</b>	<b>7</b>	6.1 Zur Prüfung geotextiler Schutzschichten	19
2.1 Allgemeines	7	6.2 Zur Auswahl von Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien	19
2.2 Angaben in Regelwerken	7	6.3 Schlußbemerkungen	20
2.3 Analyse der Beanspruchungen	8	<b>7 LITERATUR</b>	<b>21</b>
2.4 Vorhandene Untersuchungsergebnisse	8	<b>8 VERZEICHNIS DER ANLAGEN</b>	<b>22</b>
<b>3 PRÜFMATERIALIEN</b>	<b>9</b>		
3.1 Allgemeines	9		
3.2 Kunststoffdichtungsbahnen	9		
3.3 Geotextilien	10		
<b>4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN IM IGBE (TEIL I)</b>	<b>10</b>		
4.1 Versuchsprogramm	10		
4.2 Versuchsbeschreibung	10		
4.2.1 Weggesteuerte Durchdrückversuche	10		
4.2.2 Kraftgesteuerte Druckversuche	11		
4.2.3 Kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung	11		
4.3 Versuchsergebnisse	12		
4.3.1 Vorbemerkungen	12		
4.3.2 Weggesteuerte Durchdrückversuche	12		
4.3.3 Kraftgesteuerte Druckversuche	12		
4.3.4 Kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung	13		
4.4 Erkenntnisse aus den Versuchsergebnissen	13		
4.4.1 Zur Versuchsdurchführung	13		
4.4.2 Zum Vergleich der Versuchsvarianten	14		
4.4.3 Zum Vergleich der Prüfmaterialien	14		
<b>5 FLÄCHENDRUCKVERSUCHE IN DER STUVA (TEIL II)</b>	<b>15</b>		
5.1 Ziel der Versuche	15		
5.2 Versuchsbeschreibung	15		
5.3 Prüfmaterialien	16		



## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Für die nächsten Jahre wird der Bau zahlreicher Tunnel prognostiziert. Ein großer Anteil dieser Tunnelbauwerke wird in geschlossener Bauweise mit Spritzbetonmethode hergestellt (HAACK, 1998). Außerdem nimmt der Anteil der Tunnelbauwerke im Druckwasserbereich zu.

Tunnelbauwerke im wasserführenden Boden und Fels müssen zuverlässig abgedichtet werden. Es gibt unterschiedliche Abdichtungskonzeptionen: Ausbildung eines wasserundurchlässigen Betonbauwerkes (WUBB), Anordnung einlagiger oder doppelagiger Kunststoffdichtungsbahnen und Ausbildung eines wasserundurchlässigen Betonbauwerkes mit einer zusätzlichen einlagigen Kunststoffdichtungsbahn. Die Wahl der Abdichtungskonzeption ist abhängig vom Wasserdruck im Baugrund, von der Art bzw. der Aggressivität des anstehenden Wassers und Bodens und von der Bauweise.

Da Kunststoffdichtungsbahnen empfindlich gegenüber punktuellen mechanischen Beanspruchungen sind, müssen sie in geeigneter Weise vor Beschädigungen geschützt werden. Zu diesem Zweck wird zwischen der Spritzbetonaußenschale mit rauher Oberfläche und der Kunststoffdichtungsbahn eine geotextile Schutzschicht angeordnet. Die Innenbetonschale wird hingegen unmittelbar gegen die Kunststoffdichtungsbahn betoniert. Die Richtlinien und Regelwerke enthalten nur generelle Angaben zur Auswahl der geotextilen Schutzschicht, die sich in der Tunnelbaupraxis in vielen Fällen als unzureichend erwiesen haben, und keine Hinweise zur Prüfung der Schutzwirksamkeit.

Das Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover und die Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Köln, wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Bergisch Gladbach, beauftragt, die Wirksamkeit geotextiler Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Tunnelbauwerken mit Spritzbetonaußen- und Betoninnenschale zu untersuchen. Das Untersuchungsprogramm dient einerseits der Verbesserung der Prüfmethodik und andererseits dem Vergleich unterschiedlicher geotextiler Schutzschichten. Im IGBE wurden Versuche mit Druckstempeln zur Nachbildung von spitzen Zuschlagkörnern in der Spritzbetonoberfläche (Teil I) und bei der STUVA Flächendruckversuche in einem Brunnenkopf mit einer mit Zuschlagkörnern beklebten Abdichtungsrücklage (Teil II) durchgeführt.

## 2 Stand der Kenntnisse

### 2.1 Allgemeines

Anl. 1 zeigt einen mit Spritzbetonmethode hergestellten Tunnelquerschnitt mit Kunststoffdichtungsbahn. In Detailskizzen wird der Aufbau eines Dichtungssystems mit ein- und mit doppelagiger Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen verdeutlicht. Die Bahnen müssen im Bau- und Betriebszustand wasserseitig vor Beschädigungen infolge punktueller Druckbeanspruchungen geschützt werden. Dazu werden in der Regel geotextile Schutzschichten verwendet.

### 2.2 Angaben in Regelwerken

Die Regelwerke enthalten nur sehr generelle Angaben zu geotextilen Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau.

Teil 10 der DIN 18195 in der Ausgabe von 1983 enthält nur konkrete Angaben zu Schutzschichten aus Mauerwerk, Beton, Mörtel, Platten, Gußasphalt und Bitumendichtungsbahnen. Für Schutzschichten aus sonstigen Stoffen, z.B. aus Kunststoffen oder Schaumkunststoffen, werden nur die für alle Schutzschichtarten geltenden generellen Anforderungen genannt, nämlich eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen die einwirkenden mechanischen, sowohl statischen als auch dynamischen, und thermischen Beanspruchungen und die Gewährleistung eines dauerhaften Schutzes der Bauwerksabdichtung.

Die für Eisenbahntunnel maßgebende Richtlinie DS 853 (DEUTSCHE BUNDESBahn, 1993), die für Straßenbautunnel maßgebende Richtlinie ZTV Tunnel (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, 1995) und die Empfehlungen Doppeldichtung Tunnel EDT (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK, 1997, SCHLÜTTER, 1998) enthalten Materialanforderungen an die Kunststoffdichtungsbahn und an die geotextile Schutzschicht. Anl. 2.1 und 2.2 enthalten Zusammenfassungen der Anforderungen.

In den Regelwerken fehlen aber bisher Hinweise, wie die Eignung geotextiler Schutzschichten abhängig von den jeweiligen Bauwerksrandbedingungen nachgewiesen werden kann. Die Auswahl, Dimensionierung und Optimierung der geotextilen Schutzschichten und Kunststoffdichtungsbahnen wird durch fehlende allgemein anerkannte Nachweisverfahren erschwert. Die Auswahl muß zur Zeit auf Grundlage der generellen Vorgaben in den Regelwerken und aufgrund persönlicher Erfahrungen getroffen werden. In der Vergangenheit traten immer wieder Schäden auf, die nur mit hohem Kostenaufwand reparierbar sind.

## 2.3 Analyse der Beanspruchungen

Experimentelle Standardprüfmethoden müssen die Beanspruchungen und Randbedingungen in Tunnelbauwerken in geeigneter Weise möglichst einfach modellieren. Zu diesem Zweck müssen die im Bau- und Betriebszustand wirkenden Beanspruchungsmechanismen, Lastfälle, Lasthöhen und Randbedingungen analysiert werden. Es sind generell die im Bauzustand maßgebenden Belastungen von der Tunnelinnenseite und im Betriebszustand vorwiegend von der Außenseite wirkende Lasten zu unterscheiden. Im Bauzustand treten Punktlasten (z.B. Stöße durch Bewehrungseisen), Betonierdruck und Lasten durch Baustellenverkehr auf. Die Kunststoffdichtungsbahn wird also gegen den Abdichtungsträger gedrückt. Im Betriebszustand wirken Wasserdruckspannungen, Gebirgsdruckspannungen ggf. mit Quell- bzw. Schwelldruckspannungen von außen nach innen und Verkehrslasten von innen nach außen. Weiterhin sind lokale Zug- bzw. Dehnungsbeanspruchungen von Kunststoffdichtungsbahn und Geotextil z.B. infolge unregelmäßiger Geometrien des Abdichtungsträgers im Bereich von Ankerköpfen oder tangentielle Relativverschiebungen zwischen Spritzbeton, Geotextil, Kunststoffdichtungsbahn und Innenbetonschale möglich. Die Fachliteratur enthält nur wenige Angaben über die Höhe der für die Kunststoffdichtungsbahn und die geotextilen Schutzschichten maßgebenden Druck-, Zug- und Dehnungsbeanspruchungen und über die maßgebenden Lastkombinationen. Es werden weder Berechnungs- noch Meßergebnisse angegeben. STÄDING und WINSELMANN (1998) weisen beispielsweise darauf hin, daß in der statischen Berechnung bei Verlust der Tragfähigkeit der Spritzbetonschale z.B. infolge aggressiven Gebirgswassers der dann wirksam werdende Druck auf die Innenbetonschale in der statischen Berechnung berücksichtigt werden muß. Anhaltswerte für die Größe der Belastung geben sie aber nicht.

Die geotextile Schutzschicht muß unzulässige punktuelle Druckkonzentrationen und Beschädigungen der Kunststoffdichtungsbahn infolge von Zuschlagstoffkörnern an der Spritzbetonoberfläche verhindern. Die lokalen Druckbeanspruchungen stehen in Wechselwirkung mit den genannten Beanspruchungen im Bau- und Betriebszustand, deren Größe, Zusammenspiel und Wirkungsdauer nicht ausreichend bekannt sind. In den EDT (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK, 1997) wird der Betonierdruck als wesentliche Belastung angegeben. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird angenommen, daß beim Betonieren der Innenbetonschale Betonierdrücke bis zu 2,5 bar, also 250 kN/m<sup>2</sup>, auftreten können.

## 2.4 Vorhandene Untersuchungsergebnisse

Geotextile Schutzschichten werden auch in anderen Anwendungsgebieten als im Verkehrstunnelbau, nämlich für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponiedichtungssystemen, für Rohre und Schächte oder für Dachabdichtungen, verwendet. Umfangreiche Untersuchungen zur Wirksamkeit geotextiler Schutzschichten wurden bisher nur für die Anwendung im Deponiebau durchgeführt. BRUMMERMANN (1997) erläutert den Stand der Kenntnisse zur Prüfung und Bewertung der Wirksamkeit geotextiler Schutzschichten im Deponiebau. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß in Deutschland üblicherweise Druckversuche durchgeführt werden, in denen der Aufbau der Dichtungssysteme nachgebildet wird. Die Prüfsysteme werden über eine bestimmte Zeit belastet, und anschließend werden die entstandenen Verformungen und Oberflächenbeschädigungen der Kunststoffdichtungsbahnproben ermittelt. Die im Deponiebau verwendeten Prüfmethode können nicht unmittelbar auf den Tunnelbau übertragen werden. In Kombinationsdichtungssystemen von Deponien liegt die Kunststoffdichtungsbahn auf der mineralischen Dichtungsschicht, also einer nachgiebigen Stützschiicht, und wird durch Dränmaterial belastet, dessen einzelne Körner nicht fest miteinander verbunden sind. Die Auflast aus dem Abfallkörper ist bekannt. Je nach Abfallart können unterschiedlich hohe Temperaturen auftreten. Wegen der notwendigen Beständigkeit gegenüber aggressiven Sickerwässern kommen ausschließlich von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, zugelassene 2,5 mm dicke Dichtungsbahnen aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) zum Einsatz. Da PEHD-Bahnen nur geringe Dehnungen vertragen, sind für die Auswahl der Schutzschicht in der Regel die durch die groben Körner der Dränschicht in Verbindung mit der nachgiebigen Stützschiicht verursachten Dehnungen maßgebend. Im Tunnelbau werden hingegen flexiblere, dehnfähigere Dichtungsbahnen eingesetzt. Für die Auswahl der geotextilen Schutzschicht sind daher im Tunnelbau in der Regel lokale Einkerbungen bzw. Perforationen und nicht die Überschreitung der zulässigen Dehnung maßgebend.

Bei der STUVA, Köln, wurden bereits Ende der achtziger Jahre Druckversuche an Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen und mehrlagigen Bitumenabdichtungen in dem in Kap. 5 beschriebenen Prüfgerät durchgeführt. Es wurden eine Dichtungsbahn aus weichmacherhaltigem Polyvinylchlorid (PVC-P) mit 1,5 mm Dicke, zwei Bahnen aus modifiziertem Ethylencopolymerisat-Bitumen (ECB) mit 1,5 und 2 mm Dicke und eine aus modifiziertem Polyethylen (PE)

mit 1,5 mm Dicke untersucht. Als Schutzschichten wurden Dränmatten und mechanisch verfestigte Vliesstoffe verwendet. Die Vliesstoffe aus Polypropylen (PP) und einem Gemisch aus Polypropylen und Polyvinylchlorid wiesen flächenbezogene Massen von 500 g/m<sup>2</sup> auf. Bei Belastung mit 4 bar Wasserdruck über eine Zeitdauer von 14 Tagen wurden bei allen Materialkombinationen keine Undichtigkeiten festgestellt. Lokale Beschädigungen der Dichtungsbahnen durch Einkerbungen von Zuschlagskörnern der Abdichtungsrücklage und durch die Dehnung verursachte Dickenänderungen der Bahnen wurden seinerzeit noch nicht erfaßt.

Eine österreichische und eine amerikanische Norm (ÖNORM S 2076, 1993, und ASTM D 5494, 1993) beschreiben einen Perforationsversuch, bei dem ein Pyramidendruckkörper mit definierter Geometrie mit konstanter Geschwindigkeit in eine auf einer starren Aluminiumunterlage liegende Geotextil- oder Kunststoffdichtungsbahnprobe gedrückt und die Kraft beim Durchstoßen, die sogenannte Pyramidendurchdrückkraft, gemessen wird. In PÜHRINGER (1989) und WERNER und PÜHRINGER (1995) werden Ergebnisse von Pyramidendurchdrückversuchen nach ÖNORM S 2076 beschrieben. Die Auswahl der Prüfmateriale erfolgte aber vornehmlich im Hinblick auf den Einsatz im Deponiebau.

PREIN et al. (1988) berichten über in Österreich durchgeführte Modelldruckversuche zur Untersuchung der Wirksamkeit geotextiler Schutzschichten. Der Prüfsystemaufbau bestand aus einer Spritzbetonprobe, einem Geotextil, einer Kunststoffdichtungsbahn und einer mit Hilfe eines Kunststoffrohrs als Schalung auf die übrigen Schichten aufgetragenen Betonschicht als Nachbildung der Innenbetonschale. Die Prüfsysteme wurden mit einer hydraulischen Presse zunächst mit 2 N/mm<sup>2</sup> belastet. Danach wurde die Last entweder weiter gesteigert bis zu einem zusätzlichen Vorschub der Presse von 3 mm oder die obere Betonschicht horizontal um 3 mm verschoben. Es wurden drei unterschiedlich rauhe Spritzbetonmuster, zwei Dichtungsbahnen aus weichmacherhaltigem Polyvinylchlorid (PVC-P) und Ethylencopolymerisat-Bitumen (ECB) mit einer Dicke von 2 mm und als Schutzschicht ein mechanisch verfestigter Vliesstoff mit einer flächenbezogenen Masse von 500 g/m<sup>2</sup> untersucht. In allen Versuchen wurden keine Durchdringungen festgestellt. Die Deformationen der Kunststoffdichtungsbahnen werden nicht genau spezifiziert. Es wird lediglich auf teilweise starke Deformationen der ECB-Bahn hingewiesen.

SPRINGENSCHMID, SCHMIEDMAYER und SCHÖGGLER (1998) berichten über vergleichende Untersuchungen von Spritzbeton mit Kies oder Splitt als Zuschlag. Sie vergleichen unter anderem die Beschaffenheit und Rauhtiefe der Spritzbeton-

oberflächen. Sie zeigen mit Schräglichtaufnahmen, daß Spritzbetone mit Kiesedelsplitt im Vergleich zu Spritzbetonen mit Kies gleicher Körnungslinie eine glattere mit mehr Feinmörtelanteil behaftete Oberfläche aufweisen. Mit einem für Straßenoberflächen entwickelten Verfahren ermittelten sie für Spritzbetone mit Kiesedelsplitt eine geringere Rauhtiefe und damit ebenso wie bei der optischen Beurteilung eine glattere Oberfläche als für Spritzbetone mit Kies. Um die Beanspruchung von Kunststoffdichtungsbahnen bei unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit des Spritzbetons zu beurteilen, führten sie spezielle Belastungsversuche durch. Mit einer Ausgleichsschicht aus extrudiertem Polystyrol drückten sie eine 2 mm dicke PEHD-Dichtungsbahn ohne geotextile Schutzschicht 10 Minuten lang mit 5 N/mm<sup>2</sup> auf Spritzbetonproben mit unterschiedlichen Oberflächen. Sie beurteilten die Dichtungsbahnproben nach der Entlastung visuell auf ihre Beschaffenheit und in Anlehnung an DIN 52123 auf ihre Wasserundurchlässigkeit. Die auf Spritzbeton mit Kieszuschlag gepreßten Dichtungsbahnproben wiesen stärkere Beschädigungen auf als die gegen Spritzbeton mit Kiesedelsplitt gepreßten. Eine der gegen Spritzbeton mit Kies gepreßten Dichtungsbahnen war undicht, alle anderen Proben blieben wasserundurchlässig.

## 3 Prüfmateriale

### 3.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden verschiedene Anbieter von Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien angeschrieben und um Prüfmateriale für das Untersuchungsprogramm gebeten. Die Materiale sollten unter Berücksichtigung der Anforderungen in den Regelwerken und der praktischen Erfahrungen bei Tunnelbauprojekten ausgewählt werden.

### 3.2 Kunststoffdichtungsbahnen

Es wurden von drei Firmen Kunststoffdichtungsbahnen jeweils mit Dicken von zwei und drei Millimetern zur Verfügung gestellt.

In diesem Bericht werden für die unterschiedlichen Kunststoffdichtungsbahnen **dreiteilige Probenbezeichnungen** verwendet, nämlich:

- **KDB+Nr.** (Kunststoffdichtungsbahn der durch die Nr. 1, 2 oder 3 gekennzeichneten Dichtungsbahnanbieterfirma),

- eine **Abkürzung für den Rohstoff** (PE oder PVC) und
- die **Bahndicke in mm** (2 oder 3 mm).

In Anl. 3.1 sind die von den Anbieterfirmen angegebenen Materialdaten zusammengestellt. Die von den Firmen zur Verfügung gestellten Materialdaten sind nicht ausreichend, um alle in den Regelwerken enthaltenen Anforderungen überprüfen zu können. Die angegebenen Daten erfüllen im wesentlichen die gestellten Anforderungen.

### 3.3 Geotextilien

Es wurden nur von zwei Firmen Geotextilien zur Verfügung gestellt. In diesem Bericht werden für die unterschiedlichen Geotextilien **vierteilige Probenbezeichnungen** verwendet, nämlich:

- **GT+Nr.** (Geotextil der durch die Nr. 1 oder 2 gekennzeichneten Geotextilanbieterfirma),
- eine **Abkürzung für die Geotextil- bzw. Faserart** (S für Stapelfaservliesstoff, E für Endlofaservliesstoff und G für Gewebe),
- eine **Abkürzung für den Rohstoff des Vliesstoffs** (PP) und
- die **Geotextilmasse in g/m<sup>2</sup> oder bei einer Serie mit unterschiedlichen Massen x als Variable**. Bei Verbundstoffen werden bei Bedarf auch zusätzlich die Massenanteile des Vliesstoffs und des Gewebes getrennt angegeben.

In Anl. 3.2 sind die von den Anbieterfirmen angegebenen Materialdaten zusammengestellt. Die von den Firmen zur Verfügung gestellten Materialdaten sind nicht ausreichend, um alle in den Regelwerken enthaltenen Anforderungen überprüfen zu können. Die in der ZTV Tunnel und der DS 853 bzw. TL 918 039 geforderten Höchstzugkraftdehnungen werden von den Stapelfaservliesstoffen GT1 S PP x nicht erreicht. Die Stapelfaservliesstoffe GT1 S PP x und die Endlofaservliesstoffe GT2 E PP x sind keine Verbundstoffe, wie in der EDT gefordert. Außerdem werden die in der EDT geforderten Massen von mindestens 1000 g/m<sup>2</sup> und daraus resultierend die geforderten Dicken und Stempeldurchdrückkräfte nicht von allen untersuchten Geotextilien eingehalten.

## 4 Experimentelle Untersuchungen im IGBE (Teil I)

### 4.1 Versuchsprogramm

In Kap. 2 wurde aufgezeigt, daß es zur Zeit noch keinen allgemein anerkannten und erprobten Standardnachweis zur Untersuchung der Wirksamkeit geotextiler Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau gibt und wie vielfältig die Einflußparameter sind. Um einerseits Erkenntnisse im Hinblick auf die Prüfmethode und andererseits im Hinblick auf den Vergleich unterschiedlicher Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahnen zu gewinnen, wurden im IGBE folgende, in Anl. 4.1 prinzipiell dargestellte Versuchsvarianten durchgeführt, nämlich:

- weggesteuerte Durchdrückversuche,
- kraftgesteuerte Druckversuche,
- kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung.

Aufgrund des vorgegebenen Umfangs des Forschungsvorhabens konnten nicht alle in Betracht kommenden Prüfvarianten und Einflußparameter und nur einige ausgewählte Materialvarianten im IGBE und in der STUVA gemeinsam untersucht werden. In dem Versuchsprogramm wurden unter Berücksichtigung der aktuellen Fachdiskussion wesentliche Einflußgrößen und für die Anwendung im Tunnelbau repräsentative Materialien berücksichtigt. Die Versuche werden in Kap. 4.2 und die Ergebnisse in Kap. 4.3 getrennt für die genannten Versuchsarten beschrieben. In Kap. 4.4 werden daraus ableitbare Erkenntnisse zur Optimierung der Prüfmethode und zum Vergleich der Materialien erläutert.

### 4.2 Versuchsbeschreibung

#### 4.2.1 Weggesteuerte Durchdrückversuche

Es wurden weggesteuerte Durchdrückversuche in Anlehnung an ÖNORM S 2076, 1993, bzw. ASTM D 5494, 1993, an Dichtungsbahnen, Geotextilien und Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil durchgeführt. Mit einer Druckprüfmaschine wurde ein pyramidenförmiger Druckstempel mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in das auf einer starren Unterlage liegende Probenpaket hineingedrückt und die Durchdrückkraft bei Erreichen der Perforation gemessen.

Der Versuchsaufbau aus Aluminiumunterlage, Probe bzw. Probenpaket und Pyramidendruckstempel ist in Anl. 4.1 dargestellt. Die Prüfbedingungen und die Druckstempelabmessungen sind Anl. 4.2 zu entnehmen. Bei geotextilen Verbundstoffen aus Gewebe und Vliesstoff wurde die Gewebeseite dem Pyramidendruckstempel zugewandt. Vor Versuchsbeginn wurden die Anfangsdicke - für Geotextilien gemäß DIN EN 964-1 unter einer Last von 2 kPa - und die flächenbezogene Masse jeder Probe ermittelt.

Eine elektrische Signaleinrichtung, die einen Kontakt zwischen dem leitfähigen Pyramidendruckstempel und der leitfähigen Aluminiumunterlage anzeigt, wurde genutzt, um den Perforationszeitpunkt und die zugehörige Durchdrückkraft zu bestimmen.

Wegen der Vielzahl der Materialien und der möglichen Materialkombinationen aus Geotextil und Dichtungsbahn wurden teilweise nur fünf Proben eines Materials bzw. einer Materialkombination anstelle der in ÖNORM S 2076 vorgegebenen zehn untersucht. Als Versuchsergebnis werden in Abschn. 4.3.1 jeweils der Mittelwert, die Standardabweichung, die Differenz aus Mittelwert und Standardabweichung und der kleinste Einzelwert angegeben.

#### 4.2.2 Kraftgesteuerte Druckversuche

Es wurden kraftgesteuerte Druckversuche an Dichtungsbahnen, Geotextilien und Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil durchgeführt. In mechanischen Belastungsständen mit Hebelübersetzung wurde ein pyramidenförmiger Druckstempel mit über die Versuchsdauer konstanter bzw. in Stufen konstanter Kraft in die Probe bzw. das Probenpaket hineingedrückt und die Eindrückung des Druckstempels bzw. die Dicke der Probe oder des Probenpaketes unter der Druckstempelspitze abhängig von der Zeit gemessen.

Der Prüfsystemaufbau mit Aluminiumunterlage, Probe bzw. Probenpaket und Pyramidendruckkörper entspricht dem der weggesteuerten Durchdrückversuche (Anl. 4.1). Die Prüfrandbedingungen und die Druckstempelabmessungen sind Anl. 4.2 zu entnehmen. Ebenso wie bei den Durchdrückversuchen wurde bei geotextilen Verbundstoffen aus Gewebe und Vliesstoff die Gewebeseite dem Pyramidendruckstempel zugewandt. Vor Versuchsbeginn wurden die Anfangsdicke - für Geotextilien gemäß DIN EN 964-1 unter einer Last von 2 kPa - und die flächenbezogene Masse jeder Probe ermittelt.

Die Gewichte wurden vorsichtig ohne Stoß unmittelbar nacheinander aufgelegt. Eine Eindringung des Druckstempels bis auf die Oberkante der Aluminiumunterlage wird als Perforation bezeichnet. Negative Dickenwerte in den Datenzusammenstellungen bedeuten, daß der Pyramidendruckstempel in die Aluminiumunterlage eingedrungen ist. Nach der Entlastung und dem Probenausbau wurden die Einzeldicken der Geotextil- und Dichtungsbahnproben an der Einkerbung 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 Einkerbungen wurde daher nicht die minimale Restdicke erfaßt.

#### 4.2.3 Kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung

Es wurden kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung an Dichtungsbahnen, Geotextilien und Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil durchgeführt. Für diese Versuche wurde ein mechanischer Druckbelastungsstand um eine Spannvorrichtung für die Geokunststoffe und eine Belastungsvorrichtung für einaxiale Zugbeanspruchung erweitert. Alternativ kann über Umlenkrollen und Gewichte eine konstante Zugkraft aufgebracht oder mit Hilfe eines Motors eine definierte Längenänderung eingestellt und konstant gehalten werden. Wie in Abschn. 2 bereits erläutert wurde, wurden bisher noch keine Vergleichsversuche mit reiner punktueller Druckbeanspruchung sowie mit kombinierter Zug- und Druckbeanspruchung für im Tunnelbau repräsentative Materialien durchgeführt. Die Erweiterung der Versuchseinrichtung für derartige Versuche mit kombinierter Beanspruchung erfolgte in mehreren Schritten, die relativ zeitaufwendig waren und eine Reihe von Testversuchen zur Erreichung einer festen, schlupffreien Einspannung und präzisen Kraftaufbringung für die im Tunnelbau repräsentativen Dichtungsbahnen, Geotextilien und zweilagigen Probenpakete aus Dichtungsbahn und Geotextil erforderten. Der Versuchsaufbau und die Belastungsweise sind in Anl. 4.1 prinzipiell dargestellt. Anl. 4.2 enthält Angaben zu den Abmessungen und sonstigen Prüfrandbedingungen.

In einem Teil der Testversuche mit der noch nicht endgültigen Geräteversion wurde zunächst eine Druckbelastung von 625 N und 15 Sekunden später eine einaxiale Zugbelastung von 10 kN/m in Querrichtung aufgebracht. Die Prüfdauer betrug 24 h. Ergänzend wurden orientierende Versuche mit stufenweise gesteigerter Zugbeanspruchung an unterschiedlichen Prüfmateriale in Längs- und/oder Querrichtung durchgeführt.

Bei Testversuchen mit der endgültigen Geräteversion wurden die Proben bzw. Probenpakete zunächst mit einer einaxialen konstanten Zugkraft in Längsrichtung belastet. Die Größe der Zugkraft wurde anhand der orientierenden Versuche mit reiner Zugbeanspruchung so groß gewählt, daß sich Längenänderungen von etwa 10 % der Ausgangslänge einstellten. Seiteneinschnürungen, also negative Querdehnungen, wurden nicht behindert. Nach zwei Stunden wurde der pyramidenförmige Druckstempel mit einer konstanten mechanisch aufbrachten Druckkraft in die auf Zug bean-

spruchte Probe bzw. das Probenpaket hineingedrückt.

Die Längenänderung und die Dicke der Probe bzw. des Probenpaketes unter der Druckstempelspitze wurden abhängig von der Zeit gemessen. Unmittelbar nach der Entlastung und dem Probenausbau wurden die Einzeldicken der Geotextil- und Dichtungsbahnproben an der Einkerbung durch den Druckstempel 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 Einkerbungen wurde daher nicht die minimale Restdicke erfaßt.

### 4.3 Versuchsergebnisse

#### 4.3.1 Vorbemerkungen

Für die Darstellung der Zusammenhänge der Versuchsergebnisse mit der Masse der Geotextilien und der Dicke der Dichtungsbahnen werden im folgenden die tatsächlich an den Proben ermittelten Massen und Dicken verwendet. Die von den Lieferfirmen zur Verfügung gestellten Datenblätter (s. Anl. 3.1 und 3.2) beinhalten überwiegend allgemeine Angaben für diese Produkte. Da aber besonders die Materialdaten der Geotextilien recht große Streubreiten aufweisen, enthalten die Datenblätter i.d.R. über einen längeren Produktionszeitraum einhaltbare Mindestwerte. Die Geotextilmassen können beispielsweise produktionsbedingt um  $\pm 10\%$  schwanken.

#### 4.3.2 Weggesteuerte Durchdrückversuche

Es wurden weggesteuerte Durchdrückversuche an allen in Kap. 3 beschriebenen Prüfmaterialien und an ausgewählten Kombinationen aus Geotextil und Kunststoffdichtungsbahn durchgeführt. Die Kombinationen wurden so gewählt, daß mindestens eine Kunststoffdichtungsbahn mit allen Geotextilien und ein Geotextil mit allen Kunststoffdichtungsbahnen getestet wurde.

In Anl. 4.3 sind die Ergebnisse der Durchdrückversuche an einzelnen Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien und in Anl. 4.4 an Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil tabellarisch zusammengestellt.

In Anl. 4.5 ist die mittlere Durchdrückkraft abhängig von der mittleren Masse der Geotextilien für unterschiedliche Geotextiltypen dargestellt. Es sind die direkt an den Proben ermittelten Massen und nicht die in Anl. 3.2 von den Herstellern angegebenen Massen dargestellt. Die linke Abbildung zeigt die Durchdrückkräfte der Geotextilien ohne Kunststoffdichtungsbahn und die rechte die

der zweilagigen Probenpakete aus der Dichtungsbahn KDB1 PE 3 und unterschiedlichen Geotextilien. Die Durchdrückkräfte nehmen mit zunehmender Masse der Geotextilien zu. Bei den Prüfungen der Geotextilien ohne Kunststoffdichtungsbahn ergeben sich mit zunehmender Geotextilmasse ausgeprägtere Unterschiede der Durchdrückkräfte. Die Endlosfaservliesstoffe GT2 E PP x weisen größere Durchdrückkräfte auf, während die Stapelfaservliesstoffe GT1 S PP x und die Verbundstoffe GT1 S+G PP x kleinere Werte zeigen und sich bei gleicher Masse untereinander nicht wesentlich unterscheiden.

Anl. 4.6 zeigt die mittleren Durchdrückkräfte abhängig von der Anfangsdicke der Kunststoffdichtungsbahn für Versuche mit unterschiedlichen Bahntypen. Die linke Abbildung zeigt die Durchdrückkräfte der Dichtungsbahnen ohne geotextile Schutzschicht und die rechte die von zweilagigen Probenpaketen aus den unterschiedlichen Dichtungsbahnen und dem Geotextil GT1 S PP 1000. Mit zunehmender Dicke der Dichtungsbahnen nehmen die Durchdrückkräfte zu. Der Anstieg ist bei den Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil größer als bei den Dichtungsbahnen ohne geotextile Schutzschicht. Bei der PE-Bahn KDB2 PE x ergeben sich etwas höhere Durchdrückkräfte als bei den anderen beiden Bahnen.

#### 4.3.3 Kraftgesteuerte Druckversuche

Es wurden lastgesteuerte Zeitstandsversuche mit Einzeldrucklast mit Variation der Belastungshöhe, der Lastaufbringung und der Prüfmaterialien durchgeführt.

In Anl. 4.7 sind die Ergebnisse der Versuche mit variiertter Belastungshöhe und Lastaufbringung an einer Dichtungsbahn und einem Geotextil zusammengefaßt. Anl. 4.8 enthält die Ergebnisse der Versuche mit variierten Prüfmaterialien bei gleicher Einzeldrucklast von 625 N.

In Anl. 4.9 ist links für Versuche mit der Dichtungsbahn KDB1 PE 3, mit dem Stapelfaservliesstoff GT1 S PP 1000 und mit Probenpaketen aus KDB1 PE 3 und GT1 S PP 1000 die Proben- bzw. Probenpaketdicke unter der Druckstempelspitze nach 24-stündiger Druckbelastung unmittelbar vor der Entlastung und dem Ausbau abhängig von der Druckkraft dargestellt. Für die Versuche mit den Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil sind auf der rechten Seite außerdem die gleich nach dem Ausbau an der Einkerbungsstelle gemessenen Bahndicken abhängig von der Druckkraft aufgetragen. Mit zunehmender Kraft nehmen die Dicken signifikant ab. Bei nur rd. 70 % der in den weggesteuerten Durchdrückversuchen ermittelten mittleren Durchdrückkräfte (s. Abschn. 4.2.1 und 4.3.1) wurden die Proben bzw.

Probenpakete perforiert. Die Perforation bei Druckkräften unterhalb der Durchdrückkraft ist auf die höhere Belastungsgeschwindigkeit zurückzuführen. Bei den kraftgesteuerten Versuchen wurde die Druckbelastung sofort in voller Höhe aufgebracht, während sich die Kraft in den Durchdrückversuchen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm pro Minute je nach Proben- bzw. Probenpaketdicke über einen Zeitraum von mehreren Minuten aufbaut.

Die gleich nach dem Ausbau gemessenen, rechts in Anl. 4.9 dargestellten Dichtungsbahndicken sind größer als die Dicken der Probenpakete aus Dichtungsbahn und Geotextil unmittelbar vor dem Ausbau. Diese Differenzen sind überwiegend auf elastische Rückverformungen nach der Entlastung zurückzuführen, aber auch darauf, daß mit dem für die Messung verwendeten Taster sehr kleinflächige Einkerbungen nicht vollständig erfaßt werden können.

In Anl. 4.10 sind für zwei Druckversuche mit der Dichtungsbahn KDB1 PE 3 und dem Geotextil GT1 S PP 1000 mit unterschiedlicher Belastungsart und sonst gleichen Prüfrandbedingungen die Lasten und die Probenpaketdicken unter der Pyramidenspitze abhängig von der Zeit aufgetragen. Bei dem über einen Zeitraum von vier Minuten in Stufen belasteten Versuch und dem innerhalb von weniger als einer Minute direkt bis auf Vollast von 950 N belasteten Versuch ergeben sich bereits nach wenigen Minuten bis zum Versuchsende nahezu gleiche Probenpaketdicken. In den ersten Minuten ist die Dickenreduktion sehr groß, nimmt danach erheblich ab und kommt aber innerhalb der Versuchsdauer nicht völlig zum Stillstand.

Anl. 4.11 zeigt für Versuche mit der Dichtungsbahn KDB1 PE 3 und unterschiedlichen Geotextilien die Probenpaketdicken unter der Druckstempelspitze unmittelbar vor der Entlastung und die Dicken der Dichtungsbahnen gleich nach dem Ausbau abhängig von der Masse der geotextilen Schutzschicht. In Anl. 4.12 sind für dieselben Versuche wie in Anl. 4.11 die Dickenänderungen der Dichtungsbahnproben sowohl absolut in Millimetern als auch in Prozent der Anfangsdicke dargestellt. Ohne Geotextil wird die Dichtungsbahn perforiert. In allen Versuchen mit geotextiler Schutzschicht tritt keine Perforation auf. Mit zunehmender Masse des Geotextils nehmen die Dicken der Kunststoffdichtungsbahnen zu. Die Dickenänderungen liegen für die Versuche mit geotextilen Schutzschichten im Bereich von rd. 60 bis 30 %. Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Geotextiltypen, Stapelfaservliesstoff, Verbundstoff und Endlosfaservliesstoff zu erkennen.

Anl. 4.13 zeigt links die Dicken der Dichtungsbahn unter der Druckstempelspitze für verschiedene Bahnen ohne Geotextil bei sonst gleichen Prüfrandbedingungen. Rechts sind im Vergleich dazu die Ergebnisse von gleichen Versuchen aber mit dem Geotextil GT1 S PP 1000 als Schutzschicht angegeben. In den Versuchen ohne Schutzschicht wurden alle Dichtungsbahnen perforiert. In den Versuchen mit Schutzschicht wurde keine Bahn perforiert. Alle Bahnen wurden signifikant eingedrückt. Bei vergleichbarer Anfangsdicke unterscheiden sich die Restdicken der beiden PE-Bahnen nur geringfügig, während die der PVC-Bahnen deutlich geringer sind.

#### **4.3.4 Kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung**

Da für die Gerätemodifizierung unerwartet viele Testversuche durchgeführt werden mußten, konnte im vorgegebenen Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur eine sehr begrenzte Zahl von Versuchen mit Variation der Prüfmaterialien durchgeführt werden, deren Ergebnisse noch nicht verallgemeinert werden können.

In Anl. 4.14 werden exemplarisch die Ergebnisse von kraftgesteuerten Druckversuchen mit denen von Versuchen mit Druck- und Zugbeanspruchung verglichen. Die Versuche wurden an Probenpaketen der Dichtungsbahn KDB1 PE 3 und zwei unterschiedlichen Geotextilien mit etwa gleicher Masse, nämlich dem Vliesstoff GT1 S PP 1000 und dem Verbundstoff GT1 S+G PP 1000, durchgeführt. Es sind die Dicken der Probenpakete unter der Druckstempelspitze abhängig von der Zeit dargestellt sowie die Anfangsdicken der Probenpakete unter einer Normalspannung von 2 kPa und die Dicken der Dichtungsbahnen unter der Druckstempelspitze gleich nach Entlastung und Ausbau angegeben. In diesen Versuchen ist die Auswirkung der zusätzlichen Zugkraft bei den Versuchen mit Vliesstoff deutlich größer als bei den Versuchen mit Verbundstoff.

### **4.4 Erkenntnisse aus den Versuchsergebnissen**

#### **4.4.1 Zur Versuchsdurchführung**

Bei den weggesteuerten Durchdrückversuchen sind folgende Punkte besonders zu beachten:

- Der Perforationszeitpunkt und seine Ermittlung müssen eindeutig definiert werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Eine ungenaue Festlegung des Perforationszeitpunktes wirkt sich signifikant auf die Ergebnisse aus, da beim Erreichen der Perforation infolge des unmittelbaren Kontakts der Pyramidenspitze mit

der Aluminiumunterlage bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit der Anstieg der Druckkraft am größten ist.

- Die Druckstempelspitzen unterliegen einer großen Verschleißbeanspruchung. Eine Veränderung der Spitzengeometrie wirkt sich signifikant auf das Ergebnis aus.
- Die Streubreiten der Versuchsergebnisse sind erheblich, so daß eine Bewertung der Mittelwerte oder der um die Standardabweichung reduzierten Mittelwerte einer Serie von 10 Wiederholungsversuchen repräsentativer ist als die Bewertung des Minimalwertes, wie die ÖNORM S 2076 vorgibt.

Bei kraftgesteuerten Versuchen mit Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Geotextil ist es nicht möglich, die Einzeldicken von Dichtungsbahn und Geotextil unter dem Druckstempel unter Last zu messen. Die Genauigkeit der Dickenmessung der Dichtungsbahn nach dem Ausbau wird durch unterschiedliche und zeitabhängige elastische Rückverformungen, bei sehr kleinflächigen und spitzen Eindrückungen und gegebenenfalls durch Oberflächenprofilierungen der Dichtungsbahn geringer.

Bei den kraftgesteuerten Versuchen mit Zug- und Druckbeanspruchung ist besonders auf eine feste, schlupffreie Einspannung der Proben und Probenpakete zu achten.

Im Rahmen des Vorhabens konnten nicht alle Einflußgrößen in ausreichendem Maß untersucht werden. Beispielsweise wurden keine Versuche unter Wasser durchgeführt und die Druckstempelgeometrie und die Temperatur nicht variiert.

#### 4.4.2 Zum Vergleich der Versuchsvarianten

Der Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten weggesteuerten Durchdrückversuche, der kraftgesteuerten Druckversuche und der kraftgesteuerten Versuche mit Druck- und Zugbeanspruchung liefert folgende Erkenntnisse:

- Die Wirksamkeit der Schutzschichten nimmt in allen Versuchsvarianten mit zunehmender Masse der Geotextilien signifikant zu. Bei weggesteuerten Durchdrückversuchen ohne Dichtungsbahn sind merkliche Unterschiede zwischen den untersuchten Stapelfaservliesstoffen und den Endlofaservliesstoffen erkennbar, bei den weggesteuerten Durchdrückversuchen und den kraftgesteuerten Druckversuchen mit Dichtungsbahn und Geotextil hingegen nicht. Bei den ersten kraftgesteuerten Versuchen mit Zug- und Druckbeanspruchung deuten sich bei Versuchen mit Dichtungsbahn und Geotextil anders als bei den anderen Versuchsarten Unterschiede zwischen Stapelfaservliesstoffen und

Verbundstoffen aus Stapelfaservliesstoff und Gewebe an.

- Die Dicke der Kunststoffdichtungsbahnen wirkt sich sowohl bei den weggesteuerten Durchdrückversuchen als auch bei den kraftgesteuerten Druckversuchen merklich auf die Ergebnisse aus (Anl. 4.6 und 4.13). Aber nur bei den kraftgesteuerten Durchdrückversuchen mit Dichtungsbahn und Geotextil sind markante Unterschiede zwischen der PVC-Bahn und den PE-Bahnen zu erkennen. Bei den weggesteuerten Versuchen ohne Geotextilien weisen hingegen die PVC-Bahn KDB3 und die PE-Bahn KDB1 fast übereinstimmende Ergebnisse auf, während die PE-Bahn KDB2 höhere Durchdrückkräfte ergibt.

Je nach gewählter Versuchsvariante können sich demnach Unterschiede im Vergleich der Prüfmaterialien ergeben.

#### 4.4.3 Zum Vergleich der Prüfmaterialien

Die Versuchsergebnisse zeigen, wie bereits erläutert, Wechselwirkungen zwischen Kunststoffdichtungsbahn und Geotextil auf. Es ist also offenbar nicht sinnvoll, die Wirksamkeit einer Schutzschicht unabhängig von der zu schützenden Bahn zu bewerten.

Für die untersuchten Geotextilien zeigte sich in allen Versuchsvarianten ein signifikanter Einfluß der Geotextilmasse. Im Vergleich zu den Versuchen an Dichtungsbahnproben ohne Schutzschicht bewirken geotextile Schutzschichten mit einer Masse von 500 g/m<sup>2</sup> bei den weggesteuerten Versuchen eine erhebliche Zunahme der Durchdrückkräfte bzw. bei den kraftgesteuerten Versuchen eine erhebliche Reduzierung der Einkerbungstiefen. Die Schutzwirksamkeit nimmt mit zunehmender Masse weiter zu. Die Faserart wirkte sich in den weggesteuerten Durchdrückversuchen ohne Dichtungsbahn merklich aus. Bei höheren Massen ergaben sich für Endlofaservliesstoffe größere Durchdrückkräfte als für die untersuchten Stapelfaservliesstoffe und Verbundstoffe. In den kraftgesteuerten Versuchen mit Druck- und Zugbeanspruchung im IGBE und in den Flächendruckversuchen in der STUVA (s. Abschn. 5) zeigten sich tendenziell Unterschiede zwischen den Stapelfaservliesstoffen und den Verbundstoffen bei gleicher Masse. Die Verbundstoffe waren wirksamer. In diesem Zusammenhang ist aber noch zu klären, ob die aufgebrachten Zugbeanspruchungen in ihrer Größe repräsentativ sind. Außerdem ist anzumerken, daß für eine genaue quantitative Bewertung die Anzahl der bisher durchgeführten Versuche im IGBE und in der STUVA noch zu gering ist.

Die Dicke der Kunststoffdichtungsbahn wirkt sich ebenso wie die Masse des Geotextils signifikant auf die Ergebnisse aus. In den weggesteuerten Durchdrückversuchen ohne Geotextil und in den kraftgesteuerten Druckversuchen sind auch deutliche Unterschiede zwischen den Bahntypen - allerdings mit unterschiedlicher Tendenz - erkennbar. Bei den Flächendruckversuchen der STUVA wiesen die PVC-Bahnen bei den Messungen nach Ausbau größere Restdicken auf.

Wegen der bereits in Kap. 4.3.1 erläuterten Streubreiten der Materialeigenschaften wurden keine quantitativen Auswertungen und Korrelationsanalysen mit Daten aus den Produktbeschreibungen der Hersteller, wie z.B. den Höchstzug- oder Stempeldurchdrückkräften, vorgenommen.

## 5 Flächendruckversuche in der STUVA (Teil II)

### 5.1 Ziel der Versuche

Wie bereits einleitend dargelegt, werden die Hautabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn und deren geotextile Schutzschicht während der Tunnelbauphase durch Flächendruck beansprucht, der im wesentlichen durch den Betoniervorgang und im Verlauf der Firstinjektion entsteht. Außerdem ergibt sich während der Baudurchführung eine weitere Belastung im Sohlenbereich durch Begehen und Befahren. In späteren Betriebsphasen können Flächendrücke sowohl durch die Verkehrslast als auch durch großstrukturierte Gebirgsverformungen hervorgerufen werden. Vor diesem Hintergrund ist ein wirksamer Schutz der Kunststoffdichtungsbahn gegen mechanische Beschädigungen erforderlich.

In jüngster Zeit neu entwickelte Geotextilien, bestehend aus Vliesen mit einer ein- oder beidseitig angeordneten Gewebeauflage (sogenannte Geokomposite) sind in ihrer Schutzwirksamkeit für Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau bisher weitgehend unbekannt. Versuchstechnisch ist daher zu klären, wie weit derartige Geotextilien übermäßige Zugbeanspruchungen infolge sackartiger Verformungen der Kunststoffdichtungsbahn während des Betoniervorgangs in Ausbauchungen der Spritzbetonschale hinein dämpfen oder durch Gleiteffekte weitgehend ausschließen können.

In Flächendruckversuchen im Brunnentopf wurden deshalb zehn Abdichtungsaufbauten, bestehend aus Kunststoffdichtungsbahn und geotextiler Schutzschicht im Kurzzeitversuch unter einer Belastung von 4 bar (Betonier- bzw. Wasserdruck) auf ihre Wirksamkeit überprüft. Im vorgegebenen Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte nur

ein Teil der in Kap. 3 beschriebenen Materialien untersucht werden.

### 5.2 Versuchsbeschreibung

Die Versuche wurden in einem Brunnentopf mit einem lichten Innendurchmesser von 1000 mm durchgeführt, in den die Abdichtungsrücklage und darüber der zu prüfende Abdichtungsaufbau dem Versuchsprogramm entsprechend eingebaut wurden (Anl. 5.1). Nach dem Einflanschen der Kunststoffdichtungsbahn wurde von oben Wasserdruck auf die Abdichtung aufgebracht. Dieser Wasserdruck wurde stündlich um jeweils 0,5 bar bis auf 4 bar gesteigert. Bei jeder Druckstufe wurde an den Meßeinrichtungen die Durchbiegung des Abdichtungsaufbaus gemessen. Außerdem wurde die Kunststoffdichtungsbahn durch die Sichtfenster im Deckel beobachtet, um Verformungszustände und Eindrückungen visuell bewerten zu können. Die Wasserdruckbelastung von 4 bar wurde insgesamt mindestens vier Tage aufrecht erhalten. Die Durchbiegung der Abdichtungsprobe wurde während der Versuchszeit täglich einmal abgelesen. Auftretende Undichtigkeiten, d.h. durchgängige Beschädigungen des Abdichtungspakets ließen sich durch den Austritt des Leckwassers am Tiefstpunkt des Brunnentopfes unmittelbar erkennen.

Die verwendete Abdichtungsrücklage hat eine "Eierkarton"-Struktur mit Stichmaßen und Ausrundungshalbmessern von 100 mm. Die aus Beton gefertigte Rücklage ist mit Körnern der Korngruppe 4/8 beklebt, um eine strukturierte Rücklagenoberfläche als Simulation einer rauhen Spritzbetonoberfläche zu erhalten. Der gewählte Ausrundungsradius ist mit 100 mm nur halb so groß wie der in den Regelwerken DS 853 (DEUTSCHE BUNDESBahn, 1993) und ZTV-Tunnel (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, 1995) festgelegte Mindestradius für Ausrundungen. Die gewählte Flächenbelastung von 4 bar ist etwa doppelt so groß wie der in der Praxis tatsächlich zu erwartende höchste Betonierdruck von etwa 2,0 bar bis 2,5 bar. Diese beiden verschärften Versuchsbedingungen ermöglichen bei konservativem Ansatz eine Beurteilung der geprüften Abdichtungsaufbauten im hier durchgeführten Kurzzeitversuch für den praktischen Einsatz.

Die Versuchsdurchführung erfolgte bei Raumtemperatur.

Die Dichtigkeitsprüfung gilt als bestanden, wenn bis zum 4. Versuchstag bei einer Wasserdruckbelastung von 4 bar keine Undichtigkeiten aufgetreten sind.

Vor und unmittelbar nach der Flächendruckbelastung im Brunnentopf wurde die Dicke der Kunst-

stoffdichtungsbahn an zehn Stellen gemessen. Die Meßstellen befanden sich in ausgewählten Verformungsbereichen von "Bergen und Tälern", die in der Kunststoffdichtungsbahn durch die Eierkartonstruktur der Rücklage entstehen. Die Restdickenmessung erfolgte nach dem Versuch außerhalb des Brunnentopfes an besonders starken Einkerbungen in der Kunststoffdichtungsbahn.

Die Dicke der Kunststoffdichtungsbahn wurde mittels einer digitalen Meßuhr (Meßgenauigkeit  $\pm 0,015$  mm) gemessen. Der Taster der Meßuhr war als ausgerundete Spitze ausgebildet. Der Ausrundungsradius der Tasterspitze wurde so gewählt, daß der Taster einerseits ausreichend spitz war, um schmale Einkerbungen in der Kunststoffdichtungsbahn zu erfassen und andererseits jedoch nicht zu spitz war, um die Kunststoffdichtungsbahn durch die Dickenmessung zu beschädigen. Deshalb wurde in Anlehnung an die Geometrie der Druckstempelspitze bei der Bestimmung der Pyramidendurchdrückkraft nach ÖNORM S 2076 (1993) eine Tasterspitze mit dem Ausrundungshalbmesser von  $r = 0,5$  mm verwendet. Durch die Geometrie des Tasters sind die meßbaren Einkerbungen in die Kunststoffdichtungsbahn begrenzt. Schmalere Einkerbungen als der Durchmesser der Tasterspitze (mit Radius  $r = 0,5$  mm) waren nicht meßbar. Dies bedeutet, daß die festgestellten Einkerbungstiefen an einigen Stellen größer als die gemessenen sein können. Die tatsächlichen Restdicken der Kunststoffdichtungsbahn können deshalb kleiner sein als die gemessenen.

### 5.3 Prüfmateriale

Die Abdichtungsaufbauten bestehen aus einer Kunststoffdichtungsbahn und einem Geotextil. Es wurden Kunststoffdichtungsbahnen aus PVC und PE mit einer Nenndicke von 3 mm sowie eine PVC-Dichtungsbahn mit einer Nenndicke von 2 mm eingesetzt (Anl. 3.1). Die tatsächlichen Dicken der Dichtungsbahnen schwankten z.B. bei der PE-Dichtungsbahn (Typ KDB1 PE 3) bei der Nenndicke von 3 mm zwischen 3,0 mm und 3,4 mm. Dies wurde bei der Versuchsauswertung berücksichtigt (Anl. 5.2).

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den in den Versuchen eingesetzten Geotextilien um Vliesstoffe aus mechanisch verfestigten Stapelfasern und Endlofasern sowie um einen Verbundstoff aus Stapelfaservliesstoff und einseitiger Gewebeauflage (Anl. 3.2). Die untersuchten Geotextilien besaßen Nennmassen zwischen  $500 \text{ g/m}^2$  und  $1000 \text{ g/m}^2$ . Endlofaservliesstoffe besitzen höhere Zugkraftdehnungswerte als Stapelfaservliesstoffe (Anl. 3.4), was vor allem durch die Verwendung unterschiedlich langer

Fasern bei der Herstellung der Vliesstoffe hervorgerufen wird. Anders als bei den eingesetzten Endlofaservliesen sind die Fasern der Stapelfaservliese nur wenige Zentimeter lang.

### 5.4 Versuchsergebnisse

Die untersuchten Abdichtungsaufbauten sind aus Anl. 5.2 ersichtlich. Aufgrund der beschränkten Versuchsanzahl konnte mit jedem Abdichtungsaufbau nur jeweils ein Einzelversuch durchgeführt werden.

Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (Anl. 5.2):

- **Dichtigkeit der Abdichtungsaufbauten:** Alle untersuchten Materialkombinationen (Kunststoffdichtungsbahn/Geotextil) waren nach einer mindestens 4 Tage langen Auflast von 4 bar dicht.
- **Durchbiegung der Abdichtungsaufbauten:** Bei allen Versuchen wurde die maximal mögliche Durchbiegung von 100 mm (Stichmaß der Abdichtungsrücklage) bei einer Wasserdruckbelastung von 4 bar ungefähr nach einer einstündigen Standzeit gemessen. Bei einer Wasserdruckbelastung von 2 bar (Anl. 5.2, Versuch Nr. 7a) wurde das Stichmaß der Abdichtungsrücklage jedoch erst nach einer Standzeit von ca. 4 Tagen erreicht.
- **Restdicke der Kunststoffdichtungsbahnen:** Die Dickenmessung der Kunststoffdichtungsbahnen vor Versuchsbeginn zeigte, daß bei einer Nenndicke von 3 mm die Ausgangsdicke der PE-Dichtungsbahnen des Typs KDB1 PE 3 im Mittel zwischen 3,0 mm und 3,4 mm und des Typs KDB2 PE 3 bei ca. 3,1 mm lag. Die mittleren Ausgangsdicken der Dichtungsbahnen aus PVC (Typ KDB3 PVC 3) betragen für eine Nenndicke von 3 mm zwischen etwa 2,8 mm und 3,1 mm. Da bei gleicher Nenndicke die mittleren Ausgangsdicken stark schwanken (ca. 10 % und mehr), ist für die Beurteilung der Schwächung der Kunststoffdichtungsbahnen die Restdicke sowohl als absoluter als auch als prozentualer Wert, bezogen auf die jeweilige Ausgangsdicke, angegeben (Anl. 5.2). Die mittleren Restdicken der Kunststoffdichtungsbahnen liegen nach der Versuchsdurchführung zwischen 81 % und 97 % der jeweiligen Ausgangsdicke (Anl. 5.2, Spalte 10). In Einzelfällen wurden jedoch nur Restdicken von ca. 56 % festgestellt (Anl. 5.2, Versuch Nr. 6, Spalte 12).
- **Einfluß der Auflast:** Im Versuch Nr. 7 wurde der Abdichtungsaufbau für jeweils vier Tage mit 2 bar und nachfolgend mit 4 bar

belastet. Bei der Inaugenscheinnahme der 3 mm dicken Dichtungsbahn aus PE wurden nach den Belastungen keine unterschiedlich starken Einkerbungen infolge der verschiedenen großen Auflasten beobachtet. Dies wurde auch durch die Messung der mittleren Restdicke bestätigt, die in beiden Fällen ca. 97 % betrug (Anl. 5.2, Spalte 10).

- **Einfluß der Geotextilien:**

- **Masse:** Es wurde ein Abdichtungsaufbau mit Stapelfaservlies (Masse 500 g/m<sup>2</sup>) und einer PE-Dichtungsbahn (Typ KDB1 PE 3, Nenndicke 3 mm) im Vergleich zum gleichen Dichtungsbahn- und Geotextiltyp, jedoch mit einer größeren Masse von 800 g/m<sup>2</sup>, geprüft (Anl. 5.2, Versuche Nr. 6 und Nr. 8 und Anl. 5.3). Erwartungsgemäß stieg die Restdicke der Kunststoffdichtungsbahn bei höherer Geotextilmasse von etwa 82 % (500 g/m<sup>2</sup>) auf 88 % (800 g/m<sup>2</sup>) an. Erwartungsgemäß wurde dieses Materialverhalten ebenfalls bei einer PVC-Dichtungsbahn (Typ KDB3 PVC 3) mit Massen von 800 und 1000 g/m<sup>2</sup> beobachtet (Anl. 5.2, Versuche Nr. 2 und 5, und Anl. 5.3).
- **Faserart:** Bei Verwendung eines Stapelfaservlieses mit einer Masse von 500 g/m<sup>2</sup> (Anl. 5.2, Versuch Nr. 6) betrug die mittlere Restdicke der PE-Dichtungsbahn (Typ KDB1 PE 3, Nenndicke 3 mm) ca. 82 %. Wurde bei gleicher Dichtungsbahn und gleicher Geotextilmasse jedoch ein Endlosfaservlies (Anl. 5.2, Versuch Nr. 7b) verwendet, so konnte eine mittlere Restdicke von ungefähr 97 % gemessen werden. Die beobachtete größere Restdicke der Kunststoffdichtungsbahn durch Verwendung eines Endlosfaservlieses statt eines Stapelfaservlieses wurde auch durch die Ergebnisse der Versuche Nr. 2 und 3 (Anl. 5.2) bestätigt. Hier stieg die Restdicke der PVC-Dichtungsbahn bei Verwendung eines Endlosfaservlieses anstelle eines Stapelfaservlieses (Masse 800 g/m<sup>2</sup>) von ca. 81 % auf etwa 90 % an.
- **Vergleich von Vliesstoff und Verbundstoff:** Es wurden vergleichend ein Stapelfaservliesstoff und ein Verbundstoff mit einer PVC-Dichtungsbahn (Nenndicke 3 mm) geprüft (Anl. 5.2, Versuch Nr. 4 und Nr. 5). Der Verbundstoff bestehend aus einem Stapelfaservliesstoff (800 g/m<sup>2</sup>) und einem PEHD-Gewebe (200 g/m<sup>2</sup>) wurde mit der

Gewebeseite auf die Abdichtungsrücklage eingebaut. Die mittlere Restdicke der Kunststoffdichtungsbahn betrug ca. 96 %, während bei dem reinen Stapelfaservliesstoff (1000 g/m<sup>2</sup>) nur eine Restdicke von ca. 86 % gemessen wurde.

- **Einfluß der Kunststoffdichtungsbahnen:**

- **PVC-Bahn mit Nenndicke 2 mm vom Typ KDB3 PVC 2:** Die PVC-Bahn mit einer mittleren Ausgangsdicke von ca. 2,0 mm wurde mit einem Stapelfaservlies mit einer Masse von 800 g/m<sup>2</sup> geprüft (Versuch Nr. 1, Anl. 5.2). Die mittlere Restdicke betrug ungefähr 1,7 mm, das entspricht ca. 85 % der mittleren Ausgangsdicke. Im Vergleich hierzu wurde bei Verwendung des gleichen Dichtungsbahntyps, allerdings mit 3 mm Nenndicke, sowie des gleichen Geotextils (Versuch Nr. 2) nach dem Versuch die mittlere Restdicke der Kunststoffdichtungsbahn mit nur 81 % der Ausgangsdicke bestimmt. Die größere Zusammendrückung der Kunststoffdichtungsbahn kann eventuell auf die größere Ausgangsdicke zurückgeführt werden. Dies wurde auch bei den Zeitstandsdruckversuchen (Kap. 4) beobachtet.
- **PVC-Bahn mit Nenndicke 3 mm vom Typ KDB3 PVC 3:** Es wurden drei Versuche (Anl. 5.2, Versuche Nr. 2 bis 4) mit dieser PVC-Bahn und Geotextilien mit Massen von 800 und 1000 g/m<sup>2</sup> durchgeführt. Die größten Eindrückungen in die Dichtungsbahn von ca. 0,7 mm wurden erwartungsgemäß bei der kleineren Geotextilmasse von 800 g/m<sup>2</sup> (Versuch Nr. 2 mit Stapelfaservliesstoff) gemessen (Anl. 5.3). Die geringsten Einkerbungen von 0,2 mm wurden bei dem Geotextil aus Verbundstoff mit größerer Gesamtmasse von 1000 g/m<sup>2</sup> festgestellt.
- **PE-Bahn mit Nenndicke 3 mm vom Typ KDB1 PE 3:** Mit dieser PE-Bahn wurden vier Versuche mit Geotextilien mit Massen von 500 g/m<sup>2</sup>, 800 g/m<sup>2</sup> und 1000 g/m<sup>2</sup> durchgeführt (Anl. 5.2, Versuche Nr. 6, 7, 8 und 10). Am stärksten wurde die Kunststoffdichtungsbahn beim Stapelfaservlies mit einer Masse von 500 g/m<sup>2</sup> geschwächt. Die Einkerbung in die Kunststoffdichtungsbahn betrug ca. 1,5 mm (Anl. 5.2, Versuch Nr. 6). Die geringsten Einkerbungen wurden mit etwa 0,2 mm

beim Endlofaservlies mit einer Masse von ebenfalls  $500 \text{ g/m}^2$  bestimmt (Anl. 5.2, Versuch Nr. 7b).

- **PE-Bahn mit Nenndicke 3 mm vom Typ KDB2 PE 3:** Diese PE-Bahn mit einer mittleren Ausgangsdicke von rd. 3,1 mm wurde nur in Kombination mit einem  $800 \text{ g/m}^2$  schweren Stapelfaservlies untersucht (Anl. 5.2, Versuch Nr. 9). Die mittlere Restdicke der Kunststoffdichtungsbahn nach dem Versuch betrug ca. 90 %. Dieser Wert wurde auch ungefähr mit dem gleichen Geotextil und der PE-Bahn Typ KDB1 PE 3 (Nenndicke 3 mm) ermittelt (maximale Einkerbungen siehe unten unter "Vergleich unterschiedlicher PE-Bahnen").
- **Vergleich von PVC mit PE:** Bei Verwendung eines Verbundstoffes als Schutzschicht mit einer Masse von  $1000 \text{ g/m}^2$  wurden bei Kunststoffdichtungsbahnen mit Ausgangsnenn-dicken von 3 mm bei der PVC-Bahn ca. 0,2 mm (Anl. 5.2, Versuch Nr. 4) tiefe Einkerbungen und bei der PE-Bahn (Typ KDB1 PE 3) ca. 0,8 mm (Anl. 5.2, Versuch Nr. 10) tiefe Einkerbungen gemessen. Bei Einsatz eines Geotextils mit einer Masse von  $800 \text{ g/m}^2$  wurde eine maximale Einkerbung in die Kunststoffdichtungsbahn bei PVC von ca. 0,7 mm und bei PE (Typ KDB1 PE 3) von ca. 0,9 mm gemessen (Anl. 5.2, Versuche Nr. 2 und Nr. 8 und Anl. 5.4). Das bedeutet, daß in den durchgeführten Versuchen die PE-Bahn des Typs KDB1 PE 3 jeweils stärker geschwächt wurde als die Dichtungsbahn aus PVC.
- **Vergleich unterschiedlicher PE-Bahnen:** Die maximalen Einkerbungen in die Kunststoffdichtungsbahn mit einer Nenndicke von 3 mm bei Verwendung eines Geotextils mit einer Masse von  $800 \text{ g/m}^2$  betrug bei der PE-Bahn (Typ KDB1 PE 3) ca. 0,9 mm (Anl. 5.2, Versuch Nr. 8) und bei der PE-Bahn (Typ KDB2 PE 3) rd. 0,5 mm (Anl. 5.2, Versuch Nr. 9, und Anl. 5.5). Die mittlere Restdicke war jedoch bei beiden Dichtungsbahntypen mit ca. 89 % ungefähr gleich. Da es sich hier nur um den Vergleich zweier Einzelversuche handelt, sind weitere Versuche zur Bestätigung erforderlich.
- **Rückverformung der PVC-Bahn nach Entlastung:** Die Restdicken der Dichtungsbahn aus PVC wurden direkt nach Versuchsende und ca. 24 Stunden später

gemessen. Nach ca. 24 Stunden ohne Belastung vergrößerte sich die Dicke der PVC-Dichtungsbahn im Mittel um ca. 3 % (Anl. 5.2, Versuche Nr. 1 und 4).

## 5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Flächendruckversuchen wurden verschiedene geotextile Schutzschichten auf ihre Wirksamkeit zum Schutz von Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen untersucht.

Alle Abdichtungsaufbauten (Kunststoffdichtungsbahn/Geotextil) bestanden bei einer mindestens viertägigen Belastung von 4 bar Wasserdruck die Dichtigkeitsprüfung.

Ferner wurden alle Abdichtungsaufbauten derart verformt, daß das Geotextil jeweils den tiefsten Punkt der Abdichtungsrücklage berührte. Die Durchbiegung der Abdichtungsaufbauten entsprach folglich dem Stichmaß der Abdichtungsrücklage von ca. 100 mm.

Die untersuchten Kunststoffdichtungsbahnen wurden im Versuch aufgrund ihrer Materialeigenschaften und in Abhängigkeit von den verwendeten geotextilen Schutzschichten unterschiedlich geschwächt. Die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei Verwendung des gleichen Geotextiltyps mit der gleichen Kunststoffdichtungsbahn wurden mit zunehmender Geotextilmasse geringere Einkerbungen in die Kunststoffdichtungsbahn gemessen.
- Bei gleicher Geotextilmasse und gleicher Kunststoffdichtungsbahn waren die Einkerbungen in die Kunststoffdichtungsbahnen beim Endlofaservliesstoff geringer als beim Stapelfaservliesstoff.
- Bei Verwendung eines Geotextils aus Verbundstoff, bestehend aus einem Stapelfaservliesstoff mit einem einseitigen PEHD-Gewebe, wurden geringere Einkerbungen in die Kunststoffdichtungsbahn gemessen als bei Verwendung eines Geotextils nur aus Stapelfaservliesstoff mit gleicher Masse. Dies gilt nur bei Verwendung der gleichen Dichtungsbahn.
- Bei Versuchen mit gleicher Schutzschicht und variierten Dichtungsbahntypen wurden bei der PVC-Dichtungsbahn geringere maximale Einkerbungen gemessen als bei der PE-Dichtungsbahn Nr. 1, aber größere Einkerbungen als bei der PE-Dichtungsbahn Nr. 2.

## 6 Gesamtbewertung, Empfehlungen und Ausblick

### 6.1 Zur Prüfung geotextiler Schutzschichten

Wie in Kap. 4 und 5 erläutert, gibt es Wechselwirkungen zwischen dem Materialverhalten und der Dicke der Kunststoffdichtungsbahn und der Wirksamkeit der geotextilen Schutzschicht. Daher ist es empfehlenswert, Schutzwirksamkeitsprüfungen an Probenpaketen aus Dichtungsbahn und Schutzschicht bzw. bei Doppeldichtungen an Probenpaketen aus beiden Dichtungsbahnlagen und Schutzschicht durchzuführen.

Bei den Druckversuchen mit Pyramidendruckstempeln sollen die Druckstempel wegen des in Kap. 4 erläuterten großen Einflusses der Spitzegeometrie des Druckstempels und der besonders bei Durchdruckversuchen hohen Verschleißbeanspruchung unbedingt aus gehärtetem Stahl gefertigt und die Spitzegeometrie regelmäßig überprüft werden. Bei Überschreitung zulässiger Toleranzbereiche sind die Druckstempel nachzuarbeiten oder auszutauschen.

Um repräsentative und quantifizierbare Ergebnisse zu erhalten, ist sowohl für weggesteuerte Durchdruckversuche als auch für die kraftgesteuerten Versuche eine ausreichende Zahl von Wiederholungsversuchen durchzuführen.

Die in Kap. 5 beschriebenen Flächendruckversuche der STUVA im Brunnenkopf mit Originalspritzbetonzuschlag bilden die Situation in situ wirklichkeitsnäher ab als die im IGBE durchgeführten Versuche. Aufgrund ihres Aufwandes sind sie aber für umfangreiche Prüfmaterial- und Beanspruchungsvariationen weniger geeignet. Im Rahmen des Vorhabens konnten keine Flächendruckversuche unter Wiederholbedingungen durchgeführt werden, was bei quantitativen Vergleichen der Ergebnisse berücksichtigt werden muß. Zur Eingrenzung der Streubreiten sind Versuche unter Wiederholbedingungen notwendig.

Flächendruckversuche im Brunnenkopf und Versuche mit geometrisch definierten Druckstempeln ergänzen sich gut. Während die einen wegen der realistischeren Nachbildung der Situation in situ als „Performance - Tests“ genutzt werden können, ermöglichen die anderen als „Index - Tests“ umfangreichere Variationen von Prüfmaterialien und Prüfbedingungen und damit umfangreichere relative Vergleiche.

Bei den Prüfungen wurden in diesem Forschungsvorhaben Annahmen zu den kritischen Belastungsfällen, sowie zur Art und Höhe der Beanspruchungen und zu den Randbedingungen getroffen. Anhand vorliegender bzw. zukünftiger

Erfahrungen in der Tunnelbaupraxis und anhand weiterer Untersuchungen sollte ihre Richtigkeit bzw. Relevanz geprüft werden.

Es stellen sich u.a. folgende Fragen:

- Wie hoch sind die beim Bau der Tunnel und im Betrieb am Dichtungssystem wirksamen Druck- und Zugkräfte bzw. Zugdehnungen?
- Wurde die Beschaffenheit der wasserseitigen Oberfläche der Tunnelinnenschale (Betonester, Minderdicken und freiliegende Bewehrungsstähle) im Zusammenhang mit der Wasserdruckbeanspruchung im Betriebszustand ausreichend berücksichtigt?
- Ist der bei den Versuchen im IGBE verwendete Pyramidendruckkörper geeignet, die Beanspruchungen durch Zuschlagkörner in der Spritzbetonoberfläche nachzubilden, oder müssen noch andere Druckstempelgeometrien getestet werden?
- Reichen Prüfungen bei rd. 20° C aus oder müssen höhere Temperaturen infolge von Hydrationswärme oder jahreszeitlich bedingte niedrige Temperaturen in den Portalbereichen ebenfalls getestet werden?
- Verändert sich die Wirksamkeit der geotextilen Schutzschichten bei Durchfeuchtung?
- Welche Beanspruchungen in Form von Einkerbungen oder Dehnungen können für die im Tunnelbau verwendeten Kunststoffdichtungsbahnen auch im Hinblick auf ihre Langzeitwirkung zugelassen werden?

### 6.2 Zur Auswahl von Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien

Da die in Kap. 4 erläuterten Versuche ohne Schutzschicht erhebliche Beschädigungen der Kunststoffdichtungsbahnen aufgezeigt haben, sollte in keinem Fall aus Kostengründen auf eine geotextile Schutzschicht verzichtet werden.

Geotextile Schutzschichten vermindern die Beanspruchungen der Kunststoffdichtungsbahnen erheblich. Sowohl die Versuche im IGBE (s. Kap. 4) als auch die bei der STUVA (s. Kap. 5) ergaben aber auch mit geotextilen Schutzschichten für die gewählten Prüfbedingungen noch signifikante lokale Einkerbungen der Kunststoffdichtungsbahnen. Es ist zu prüfen, ob die eingebrachten Beanspruchungen und die festgestellten Einkerbungen in ihrer Größe realistisch sind und ob derart geschwächte Kunststoffdichtungsbahnen auch langfristig über die gesamte Nutzungsdauer der Tunnelbauwerke dicht sind.

Die Schutzwirksamkeit nimmt mit zunehmender Masse der Geotextilien zu. Da bei Geotextilien mit der zur Zeit in den Richtlinien geforderten Mindestmasse von 500 g/m<sup>2</sup> in der Praxis häufiger Schäden aufgetreten sind, ist die Verwendung von Geotextilien mit höheren Massen empfehlenswert. Andererseits besteht bei zu dicken bzw. schweren Geotextilien die Gefahr, daß aufgrund der größeren Zusammendrückbarkeit die Nähte der Dichtungsbahnkissen von Doppeldichtungen beim Injizieren stärker aufgeweitet werden und durch diesen Schälfeffekt reißen.

Die Einflüsse der Geotextilbeschaffenheit, z.B. hinsichtlich der Gewebeart bei Verbundstoffen, der Festigkeit und des Fasertiters konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens und mit den zur Verfügung gestellten Materialien noch nicht umfassend genug untersucht werden.

Wie bereits erläutert, beeinflusst die Beschaffenheit der Kunststoffdichtungsbahn, z.B. ihre Dicke und Flexibilität, das Systemverhalten signifikant. Bei der Auswahl der geotextilen Schutzschicht sind daher die Dicke, das Materialverhalten und die Beanspruchbarkeit der jeweiligen Kunststoffdichtungsbahn zu berücksichtigen.

Die Anforderungen an Kunststoffdichtungsbahnen und geotextile Schutzschichten in der ZTV Tunnel, DS 853 und der EDT berücksichtigen die Schutzwirksamkeit bisher nur indirekt. Es wird empfohlen, einen experimentellen Schutzwirksamkeitsnachweis analog zu den hier vorgestellten Verfahren mit entsprechenden Anforderungen an die Materialien einzuführen und die übrigen Anforderungen an die Materialeigenschaften - besonders auch die Zugfestigkeiten und die zugehörigen Dehnungen - in den genannten Regelwerken unter Berücksichtigung der nun vorliegenden Untersuchungsergebnisse zu überarbeiten.

### 6.3 Schlußbemerkungen

Zur Zeit werden die bereits in Kap. 2.2 angegebenen Regelwerke ZTV Tunnel, DS 853 und EDT überarbeitet. Die Untersuchungsergebnisse dieses Vorhabens werden für die Aktualisierung der Anforderungen an Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien in Tunnelbauwerken und die Ergänzung von Vorgaben zur Prüfung der Wirksamkeit von Schutzschichten genutzt.

Die Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien, die Kriterien für ihre Auswahl und die Schutzwirksamkeitsnachweise können zukünftig noch weiter optimiert werden, indem:

- die beim Bau der Tunnel und während der Nutzungsdauer auftretenden Beanspruchungen der Kunststoffdichtungsbahnen rechnerisch und

in situ meßtechnisch genauer eingegrenzt werden,

- weitere Laborversuche zur Schutzwirksamkeit mit Variation der noch nicht ausreichend untersuchten Parameter und der für die Anwendung im Tunnelbau relevanten Materialien durchgeführt werden und
- die aus kunststofftechnischer Sicht im Hinblick auf die Langzeitwirkung zulässigen Einkerb- und Zug- bzw. Dehnungsbeanspruchungen der Kunststoffdichtungsbahnen ermittelt werden.

In der Universität Hannover werden in diesem Zusammenhang weitere Untersuchungen mit kombinierter Zug- und Druckbelastung aus eigenen Mitteln durchgeführt.

## 7 Literatur

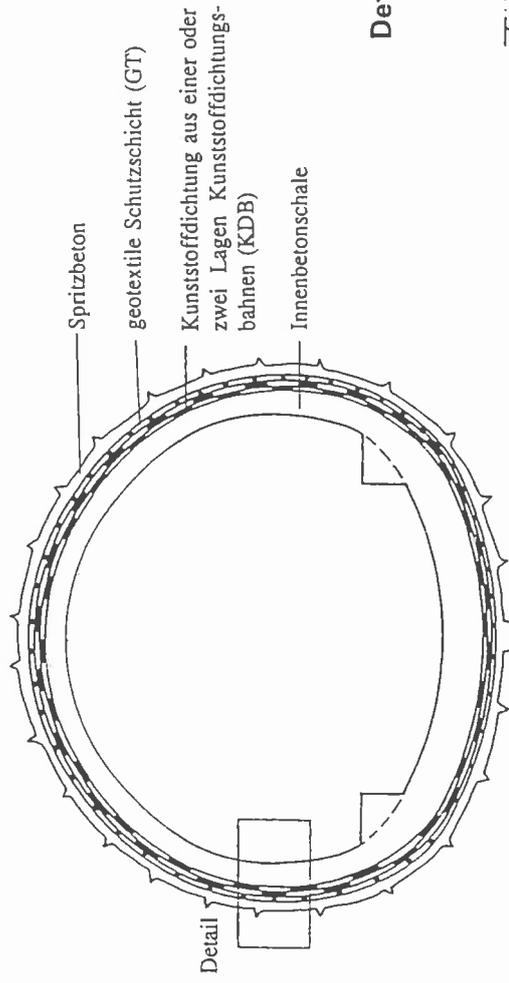
- ASTM D 5494 (1993): Standard Test Method for the Determination of Pyramid Puncture
- BRUMMERMANN, K. (1997): Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponiebasisdichtungen - Prüfung und Bewertung ihrer Wirksamkeit -, Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Heft 46
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (1995): ZTV-Tunnel - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln -, Teil 1 geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise)
- DEUTSCHE BAHN AG (1997): DB AG - TL 918 039 - Technische Lieferbedingungen Geokunststoffe
- DEUTSCHE BUNDESBahn (1993): DS 853 „Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten“
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK DGGT (1997): GDA - Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage, Verlag Ernst & Sohn
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK DGGT (1997): Empfehlungen Doppel-dichtung Tunnel - EDT, 1. Auflage, Verlag Ernst & Sohn
- DIN 4030 Teil 1 (1991): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase - Grundlagen und Grenzwerte
- DIN 16938 (1986): Kunststoff - Dichtungsbahnen aus weichmacherhaltigem Polyvinylchlorid (PVC-P) nicht bitumenverträglich - Anforderungen
- DIN 18195 Teil 10 (1983): Bauwerksabdichtungen - Schutzschichten und Schutzmaßnahmen
- HAACK, A. (1998): Tunnelbau in Deutschland: Statistik 1997/98, Analyse und Ausblick, Tunnel 3/98, S. 23 - 43
- MAIER, G., KUHNHENN, K. (1996): Ausführung und Erkenntnisse mit der doppellagigen Abdichtung im Tunnel Gernsbach, Tunnel 6/96, S. 31 - 52
- ÖNORM S 2076 (1993): Deponien: Dichtungsbahnen aus Kunststoff - Verlegung
- PREIN, R., WANDERER, J., NEUMÜLLER, W., STROBL, W., KNOLL, P., GOBIET, W. (1988): Grundlagen für Ausführung und Prüfung von Tunnelabdichtungen, Österreichisches Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten in Wien, Straßenforschung, Heft 365
- PÜHRINGER, G. (1989): Einsatz von Geotextilien im Deponiebau, 5. Nürnberger Deponieseminar, Mitteilungen des Grundbauinstituts der LGA Nürnberg, Band 54, S. 285 - 303
- SCHLÜTTER, A. (1998): Empfehlungen Doppel-dichtung Tunnel - EDT, geotechnik 21, Nr. 3, S. 166 - 172
- SPRINGENSCHMID, R., SCHMIEDMAYER, R., SCHÖGGLER, G. (1998): Vergleichende Untersuchung von Spritzbeton mit Kies oder Splitt als Zuschlag, Tunnel 2/98, S. 38 - 45
- STÄDING, A., WINSELMANN, D. (1998): Beanspruchungen des zweischaligen Tunnelausbaus unter Berücksichtigung des Baufortschritts, Bauingenieur 5/98, S. 215 - 219
- STUDIENGESELLSCHAFT FÜR UNTERIRDISCHE VERKEHRSANLAGEN e.V. (STUVA) (1987): Experimentelle Untersuchungen von Tunnelabdichtungen, Abschlußbericht
- WERNER, G., PÜHRINGER, G. (1995): Tests for Evaluation of Synthetic Liner Protection, Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, pp. 493 - 498
- Unterlagen mit Materialdaten der Anbieterfirmen ALKOR GMBH KUNSTSTOFFE, Branchen-gruppe Bau, München, GSE Lining Technology GmbH, Hamburg, HUESKER Synthetic GmbH & Co., Gescher, itb NAUE Fasertechnik GmbH & Co. KG, Kempen, und Polyfelt Deutschland GmbH, Frankfurt

## 8 Verzeichnis der Anlagen

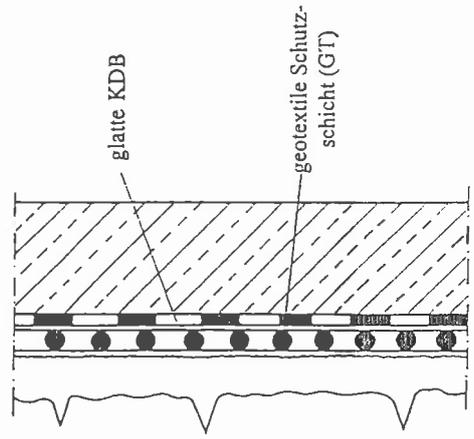
- Anl. 1: Tunnel in Spritzbetonbauweise mit einer Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen
- Anl. 2.1: Anforderungen in Regelwerken an Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau
- Anl. 2.2: Anforderungen in Regelwerken an geotextile Schutzschichten im Tunnelbau
- Anl. 3.1: Übersicht der Kunststoffdichtungsbahnen und ihrer Materialdaten (Herstellerangaben)
- Anl. 3.2: Übersicht der Geotextilien und ihrer Materialdaten (Herstellerangaben)
- Anl. 4.1: Prinzipskizzen der Versuchsvarianten im IGBE
- Anl. 4.2: Übersicht der Prüfandbedingungen
- Anl. 4.3: Ergebnisse weggesteuerter Durchdrückversuche an Einzelmaterialien
- Anl. 4.4: Ergebnisse weggesteuerter Durchdrückversuche an Pobenpaketen aus Kunststoffdichtungsbahn und Geotextil
- Anl. 4.5: Weggesteuerte Durchdrückversuche - Mittlere Durchdrückkräfte abhängig von der Masse des Geotextils für unterschiedliche Geotextilien
- Anl. 4.6: Weggesteuerte Durchdrückversuche - Mittlere Durchdrückkräfte abhängig von der Anfangsdicke der Kunststoffdichtungsbahn für unterschiedliche Bahnen
- Anl. 4.7: Ergebnisse kraftgesteuerter Druckversuche mit variierten Lasten
- Anl. 4.8: Ergebnisse kraftgesteuerter Druckversuche mit variierten Prüfmaterialien
- Anl. 4.9: Kraftgesteuerte Druckversuche - Proben- bzw. Probenpaketdicke unter der Druckstempelspitze abhängig von der Druckkraft
- Anl. 4.10: Kraftgesteuerte Druckversuche - Probenpaketdicke unter der Druckstempelspitze abhängig von der Zeit bei unterschiedlicher Belastungsart
- Anl. 4.11: Kraftgesteuerte Druckversuche - Dicke unter der Druckstempelspitze abhängig von der Masse der geotextilen Schutzschicht für unterschiedliche Geotextilien bei konstanter Druckkraft von 625 N
- Anl. 4.12: Kraftgesteuerte Druckversuche - Dickenänderung der Dichtungsbahn unter der Druckstempelspitze abhängig von der Masse des Geotextils für unterschiedliche Geotextilien gleich nach dem Ausbau
- Anl. 4.13: Kraftgesteuerte Druckversuche - Dicke der Dichtungsbahn unter der Druckstempelspitze abhängig von der Anfangsdicke der Bahn für unterschiedliche Bahnen gleich nach dem Ausbau
- Anl. 4.14: Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse von kraftgesteuerten Druckversuchen mit kraftgesteuerten Testversuchen mit Zug- und Druckbeanspruchung
- Anl. 5.1: Prinzipskizzen der Flächendruckversuche der STUVA
- Anl. 5.2: Randbedingungen und Ergebnisse der Flächendruckversuche
- Anl. 5.3: Flächendruckversuche - Maximale Einkerbtiefe der Kunststoffdichtungsbahn abhängig von der Masse der Stapelfaservliesstoffe
- Anl. 5.4: Flächendruckversuche - Maximale Einkerbtiefe variiertes Kunststoffdichtungsbahnen für variierte Kunststoffdichtungsbahnen

Anl. 1: Tunnel in Spritzbetonbauweise mit Kunststoffbahnenabdichtung

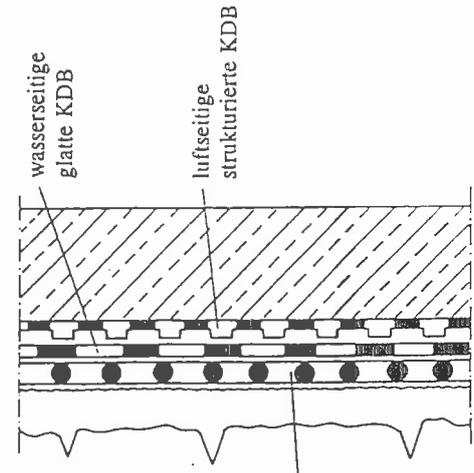
Prinzipskizze eines Tunnelquerschnitts



Detail: Einlagige Dichtung



Detail: Doppellagige Dichtung



## Anl. 2.1: Anforderungen in Regelwerken an Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau

Nr.	Stoffeigenschaften	Prüfung nach DIN	Anforderungen nach	
			ZTV Tunnel	DS 853 und TL 918039
				EDT
1	Roh- / Werkstoff	keine Angabe	keine Anford.	ECB, PVC-P, PE-LD frei von Blasen, Rissen und Lunkern
2	Allgemeine Beschaffenheit	16726, Abschn. 5.1		TPO oder PVC
3	Geradheit (g) und Planlage (p)	16726, Abschn. 5.2		g ≤ 50 mm, p ≤ 10 mm
4	Dicke ohne Signalschicht Dicke der Signalschicht	16726, Abschn. 5.3.1 keine Angabe	keine Anforderung	2,0 / 2,5 / 3,0 mm
5	Änderungen der Dichte der homogenen Bahn oder einzelner Schichten der Bahn	16726, Abschn. 5.5	keine Anforderung	Δ ≤ 0,005 g/cm <sup>3</sup>
6	Änderungen des Schmelzindex (MFR) der homogenen Bahn	53735	keine Anforderung	Δ ≤ 0,5 g/10 min bei 190° C / 5 kg
7	Reißfestigkeit in Längs- und Querrichtung	16726, Abschn. 5.6	≥ 10 N/mm <sup>2</sup>	≥ 12 N/mm <sup>2</sup>
8	Reißdehnung in Längs- und Querrichtung	16726, Abschn. 5.6	≥ 200 %	≥ 300 %
9	Spannung bei 50 % Dehnung	16726, Abschn. 5.6	keine Anforderung	≥ 4 N/mm <sup>2</sup>
10	Verhalten im Berstdruckversuch bei 1 m Ø	53861	keine Anforderung	≥ 40 % Wölbogendehnung
11	Verhalten an der Fügenaht a) beim Scherversuch b) beim Schälversuch	16726, Abschn. 5.7 Abschn. 5.7.1 Abschn. 5.7.2	Abriss außerhalb der Fügenaht keine Anforderung	Abriss außerhalb der Fügenaht Schälfestigkeit ≥ 60 % bezogen auf Kraft bei 100 % Dehnung des Grundmaterials und bei TPO Verstreckung außerhalb des Fügebereichs; keine Delamination bei doubl. Bahnen
12	Verhalten bei Wasserdruckbeanspruchung	16726, Abschn. 5.11		dicht bei Prüfdruck von 5 bar über 72 h
13	Verhalten beim Perforationsversuch	16726, Abschn. 5.12	dicht bei 750 mm Fallhöhe	dicht bei ≥ 750 mm Fallhöhe (bei 2,0 mm Bahndicke)
14	Verhalten beim Falzen in der Kälte bei -20° C	16726, Abschn. 5.14		keine Risse
15	Verhalten nach Warmlagerung bei 80° C a) Maßänderung b) Beschaffenheit c) Wärmealterung nach 70 Tagen bei 80° C	16726, Abschn. 5.13 Abschn. 5.13.1 Abschn. 5.13.2 Abschn. 5.13.3	≤ 3 % längs und quer keine Blasenbildung Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 %; keine Risse beim Falzen in der Kälte bei -20° C	≤ 2 % längs und quer keine Blasenbildung Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 %; keine Risse beim Falzen in der Kälte bei -20° C
16	Verhalten nach Lagerung in wässrigen Lösungen a) in Kalkmilch (Ca (OH) <sub>2</sub> ) b) in Schwefliger Säure (H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> )	16726, Abschn. 5.18	Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 %; keine Risse beim Falzen in der Kälte bei -20° C	Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 %; keine Risse beim Falzen in der Kälte bei -20° C
17	Brandverhalten	4102, Teil 1	Klasse B2	Klasse B1 Klasse B2

## Anl. 2.2: Anforderungen in Regelwerken an geotextile Schutzschichten im Tunnelbau

Nr.	Stoffeigenschaften	Prüfung nach <sup>1)</sup>	Anforderung nach	
			ZTV Tunnel	DS 853 und TL 918 039
1	Produktbeschreibung	keine Angabe	keine Anforderung	keine Anforderung
2	Roh- / Werkstoff	keine Angabe	keine Anforderung	generell PES, PE-HD, PP, Aramide
3	Dicke unter Normalspannung von 2 kPa 20 kPa	EN 964	≥ 3 mm (Unterschreitung ≤ 10 %) keine Anforderung	keine Anforderung Masse ≥ 500 g/m <sup>2</sup> und < 700 g/m <sup>2</sup> ; ≥ 4 mm; Masse ≥ 700 g/m <sup>2</sup> und ≤ 1000 g/m <sup>2</sup> ; ≥ 6 mm
4	Dickenänderung bei 20 kPa Dauerlast	EN 1897	keine Anforderung	keine Anforderung
5	Masse pro Flächeneinheit	DIN 53854	≥ 500 g/m <sup>2</sup> (Unterschreitung ≤ 10 %) <sup>2)</sup>	keine Anforderung ≥ 1000 g/m <sup>2</sup>
6	Höchstzugkraft längs und quer	ZTV: DIN EN ISO 10319 EDT: DIN 53857	l/q/d: ≥ 250 N/mm <sup>2</sup> ≥ 50 N/mm <sup>2</sup>	bei Masse ≥ 500 g/m <sup>2</sup> und < 700 g/m <sup>2</sup> : ≥ 7 kN/m bei Masse ≥ 700 g/m <sup>2</sup> und ≤ 1000 g/m <sup>2</sup> : ≥ 10 kN/m
7	Höchstzugkraftdehnung längs und quer	ZTV: DIN EN ISO 10319 EDT: DIN 53857	l/q/d ≥ 70 %	Gewebepeak ≤ 30 % Vliesstoffpeak ≥ 50 %
8	Stempeldurchdruckkraft	DIN 54307	≥ 2,5 kN	≥ 8 kN und ≤ 20 kN
9	Stempeldurchdruckverformung	DIN 54307	keine Anforderung	≥ 50 %
10	Pyramidendurchdruckkraft	ÖNORM S 2076	keine Anforderung	keine Anforderung
11	Brandverhalten	DIN 4102	Klasse B2	Klasse B2
12	Beständigkeit	EDT: BAM 1995	unverrottbar, chemisch beständig im pH - Bereich von 2 bis 13	Säure- und Alkalibestän- digkeit des Vliesstoffs: Δm <sub>A</sub> ≤ 25 % ΔHZK ≤ 25 % ΔHZKD ≤ 25 %
13	Wasserdurchlässigkeit bei 20 kPa senkrecht horizontal	keine Angabe	keine Anforderung keine Anforderung	keine Anforderung keine Anforderung

<sup>1)</sup> In DS 853 und TL 918039 sind keine Angaben zu Prüfvorschriften enthalten.

<sup>2)</sup> Die Anforderungen der ZTV Tunnel an die Höchstzugkraft sind im Hinblick auf die gewählte Spannungsdimension und die Beträge nicht nachvollziehbar.

### Anl. 3.1: Übersicht der Kunststoffdichtungsbahnen und ihrer Materialdaten (Herstellangaben)

0	Probenbezeichnung	KDB1 PE 2	KDB1 PE 3	KDB2 PE 2	KDB2 PE 3	KDB3 PVC 2	KDB3 PVC 3
1	Roh- / Werkstoff	PE	PE	PE	PE	PVC-P	PVC-P
2	Allgemeine Beschaffenheit	frei von Blasen, Rissen und Luntern					
3	Geradheit (g) und Planlage (p)	g ≤ 50 mm, p ≤ 10 mm	g ≤ 50 mm, p ≤ 10 mm	g ≤ 50 mm, zu p keine Angabe	g ≤ 50 mm, p ≤ 10 mm	g ≤ 50 mm, p ≤ 10 mm	g ≤ 50 mm, p ≤ 10 mm
4	Dicke ohne Signalschicht	2,0 mm	3,0 mm	2,0 mm	3,0 mm	i.M. 2,07 mm	keine Angabe
4	Dicke der Signalschicht	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe für kalandrierte Signalschicht	keine Angabe
5	Dichteänderung	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
6	Änderungen des Schmelzindex	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
7	Reißfestigkeit längs/quer	≥ 10 N/mm <sup>2</sup>	≥ 10 N/mm <sup>2</sup>	31 N/mm <sup>2</sup>	31/30 N/mm <sup>2</sup>	19,1/17,5 N/mm <sup>2</sup>	keine Angabe
8	Reißdehnung längs/quer	≥ 600 %	≥ 600 %	1043/1116 %	1075/1078 %	335/351 %	keine Angabe
9	Spannung bei 50 % Dehnung	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
10	Verhalten im Berstdruckversuch	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
11	Verhalten an der Fügenaht a) beim Scherversuch b) beim Schälversuch	Abriss außerhalb der Fügenaht keine Angabe	Abriss außerhalb der Fügenaht keine Angabe	keine Angabe keine Angabe	keine Angabe keine Angabe	Abriss außerhalb Fügenaht keine Angabe	keine Angabe keine Angabe
12	Verhalten bei Wasserdruckbeanspruchung	dicht bei 5 bar über 72 h	dicht bei 5 bar über 72 h	keine Angabe	keine Angabe	dicht bei 4 bar über 72 h	keine Angabe
13	Verhalten beim Perforationsversuch	dicht bei 750 mm Fallhöhe	dicht bei 750 mm Fallhöhe	dicht bei 2000 mm Fallhöhe	dicht bei 2000 mm Fallhöhe	dicht bei 300 mm Fallhöhe	keine Angabe
14	Verhalten beim Falzen in der Kälte	keine Risse	keine Risse	ohne Bruch	ohne Bruch	keine Risse	keine Angabe
15	Verhalten nach Lagerung bei 80° C a) Maßänderung b) Beschaffenheit c) Wärmealterung nach 70 Tagen bei 80° C	≤ 1,5 % längs und quer keine Blasenbildung Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 %; keine Risse beim Falzen bei - 20° C	≤ 1,5 % längs und quer keine Blasenbildung Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 %; keine Risse beim Falzen bei - 20° C	≤ 1,2 % keine Angabe keine Angabe	≤ 1,2 % keine Angabe keine Angabe	längs -1,44 %, quer 0,51 % keine Blasen und Lunker Änderung Reißfestigkeit und -dehnung -0,1 und -1,4 %, keine Risse beim Falzen bei -20° C	keine Angabe keine Angabe keine Angabe
16	Verhalten nach Lagerung in wässrigen Lösungen a) in Kalkmilch (Ca (OH) <sub>2</sub> ) b) in Schwefliger Säure (H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> )	Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 % sowie keine Risse beim Falzen bei - 20° C	Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung ± 20 % sowie keine Risse beim Falzen bei - 20° C	keine Angabe	keine Angabe	Änderung Reißfestigkeit und -dehnung ≤ - 11 %, keine Risse beim Falzen bei -20° C	keine Angabe
17	Brandverhalten	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe

Die Prüfungen wurden nach den in Anl. 2.1 angegebenen Normen durchgeführt.

Die Angaben zu den Dichtungsbahnen KDB1 wurden einem Prospekt der Herstellerfirma, zu den Dichtungsbahnen KDB2 Protokollen der Eigenüberwachung und zu der Dichtungsbahn KDB3 PVC 2 einem Prüfbericht der Fremdüberwachung nach DIN 16 938 entnommen.

### Anl. 3.2: Übersicht der Geotextilien und ihrer Materialdaten (Herstellerrangaben)

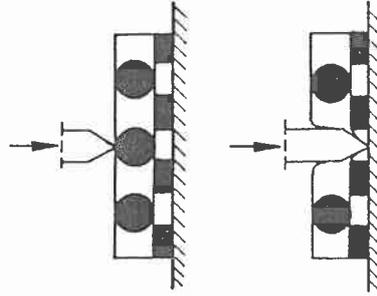
Nr.	Probenbezeichnung	GT1 S PP 500	GT1 S PP 800	GT1 S PP 1000	GT1 S PP 1200	GT1 S+G PP 700	GT1 S+G PP 1000	GT1 S+G PP 1200	GT2 E PP 500	GT2 E PP 800	GT2 E PP 1000	GT2 E PP 1200	
1	Produktbeschreibung	mechanisch verfestigter Stapelfaservliesstoff											
2	Roh- / Werkstoff	PP											
3	Dicke <sup>1)</sup> in mm unter einer Normalspannung von 2 kPa 20 kPa	≅ 4,8 keine Ang.	≅ 5,5 keine Ang.	≅ 6,0 keine Ang.	≅ 8,0 keine Ang.	≅ 4,8 keine Ang.	≅ 5,5 keine Ang.	≅ 6,0 keine Ang.	≅ 4,0 ≅ 3,0	≅ 5,3 ≅ 4,1	≅ 7,2 ≅ 6,0	≅ 8,3 ≅ 7,0	
4	Dickenänderung unter 20 kPa Dauerlast	keine Angabe											
5	Masse <sup>2)</sup> in g/m <sup>2</sup> pro Flächeneinheit	≥ 500	≥ 800	≥ 1000	≥ 1200	≥ 700	≥ 1000	≥ 1200	≥ 500	≥ 800	≥ 1000	≥ 1200	
6	Höchstzugkraft <sup>3)</sup> in kN/m längs und quer	≅ 25/35	≅ 28/55	≅ 30/ 60	≅ 35/70	Gewebe: ≥ 30/30 Vliesstoff: ≅ 25/35	Gewebe: ≥ 30/30 Vliesstoff: ≅ 28/55	Gewebe: ≥ 30/30 Vliesstoff: ≅ 25/25	≅ 30/30	≅ 42/42	≅ 48/48	≅ 52/52	
7	Höchstzugkraftdehnung <sup>3)</sup> in % längs/quer	≅ 60/55	≅ 60/50	≅ 80/45	≅ 100/50	Gewebe: ≤ 25/25 Vliesstoff: ≅ 60/55	Gewebe: ≤ 25/25 Vliesstoff: ≅ 60/50	Gewebe: ≤ 25/25 Vliesstoff: ≅ 80/45	≅ 95/90	≅ 95/90	≅ 95/90	≅ 95/90	
8	Stempeldurchdruckkraft <sup>4)</sup> in kN (x-s)	≅ 5	≅ 8	≅ 9	≅ 11	≅ 5	≅ 8	≅ 9	≅ 4,7	≅ 7,2	≅ 8,5	≅ 9,8	
9	Stempeldurchdruckverformung <sup>4)</sup> in %	keine Angabe											
10	Pyramidendurchdruckkraft <sup>5)</sup> in N	keine Angabe											
11	Brandverhalten <sup>6)</sup>	Klasse B2											
12	Beständigkeit	keine Angabe											
13	Wasserdurchlässigkeit bei 20 kPa • senkrecht • horizontal	keine Angabe keine Angabe											
1)	ohne Angabe zum Prüfverfahren für GT1 und nach DIN EN 964-1 für GT2												
2)	nach ISO 9864 für GT1 und nach DIN EN 965 für GT2												
3)	nach DIN EN ISO 10319 für GT1 und GT2												
4)	nach DIN 54307 für GT1 und nach-DIN EN ISO 12236 für GT2												
5)	als Mittelwert x - Standardabweichung s												
6)	nach ÖNORM S 2076												
6)	nach DIN 4102												

Die Angaben zu den Geotextilien GT1 wurden aus Entwürfen der Technischen Datenblätter der Herstellerfirma und zu den Geotextilien GT2 aus dem Technischen Datenblatt der Herstellerfirma entnommen. Bei GT2 sind außer in Zeile 8 die Mittelwerte aus Standardversuchen angegeben, die den üblichen Produktionsschwankungen unterliegen.

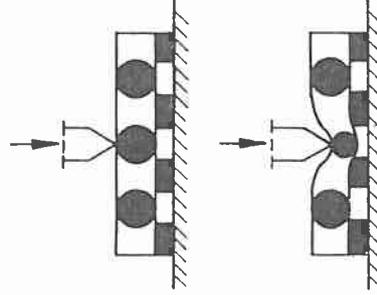
Anl. 4.1: Prinzipskizzen der Versuchsvarianten im IGBE

Kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung

Weggesteuerte Durchdruckversuche



Kraftgesteuerte Druckversuche

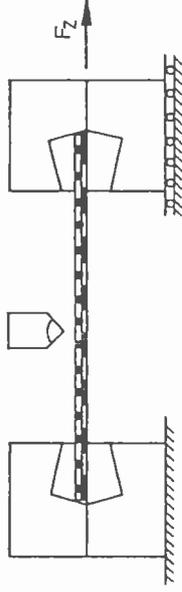


Vorschubgeschwindigkeit = konst.

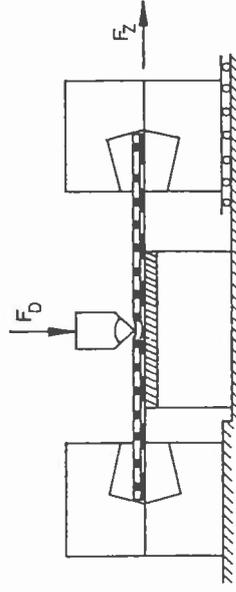
Durchdruckkraft bei Perforation = ?

Druckkraft = konst.

Dickenänderung in Abhängigkeit von der Zeit = ?



1. Phase: Zugkraft = konst.  
Längenänderung abhängig von der Zeit = ?



2. Phase: zusätzlich Druckkraft = konst.  
zusätzlich Dickenänderung abhängig von der Zeit = ?

Alternative:

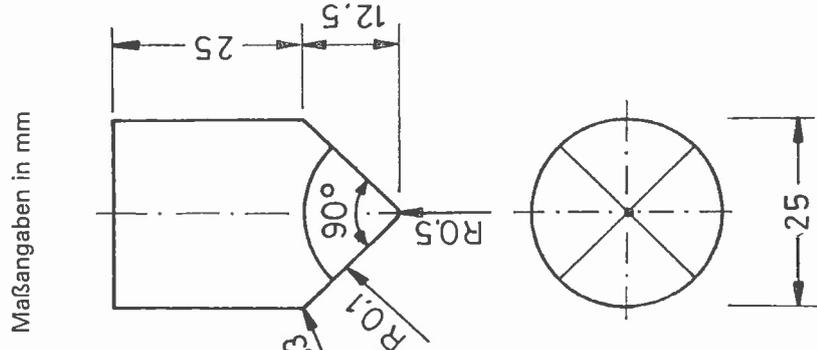
- 1. Phase: Druckkraft = konst.  
Dickenänderung abhängig von der Zeit = ?
- 2. Phase: zusätzlich Zugkraft = konst.  
zusätzlich Längenänderung abhängig von der Zeit = ?

## Anl. 4.2: Übersicht der Prüfandbedingungen

- Pyramidendruckstempel aus gehärtetem Stahl (Abmessungen s. Skizze)
- Raumtemperatur
- trockene Prüfmaterialien
- 3 mm dicke Aluminiumunterlage (AlMgSi 1 F 32 DIN 1745 - 1)

### Druckstempelgeometrie:

Pyramide



	Weggesteuerte Durchdruckversuche	Kraftgesteuerte Druckversuche	Kraftgesteuerte Versuche mit Zug- und Druckbeanspruchung
Probengröße und -befestigung	100 mm x 100 mm, nicht eingespannt	100 mm x 100 mm, nicht eingespannt	100 mm Probenbreite, variierte Probenlängen, Einspannung in Zugrichtung, keine Behinderung der Querdehnung
Weg- bzw. Kraftsteuerung	Vorschubgeschwindigkeit 1 mm/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versuchsserie mit variierten Lasten <math>\leq</math> Durchdruckkraft der weggesteuerten Versuche</li> <li>• Versuchsserie mit konstanter Druckkraft von 625 N und variierten Prüfmaterialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variierte Reihenfolge der Belastung, entweder erst Druck- und dann Zugkraft oder umgekehrt</li> <li>• variierte Lasthöhen</li> </ul>
Prüfdauer	je nach Proben- bzw. Probenpaketdicke	24 h	variiert
Versuchszahl	5 oder 10 je Probe bzw. Probenpaket	i.d.R. 2 je Probe bzw. Probenpaket	nur Testversuche, i.d.R. 1 je Probe bzw. Probenpaket

Lastaufbringung zügig aber stoßfrei, Zeiterfassung beginnt mit Abschluß der Belastung

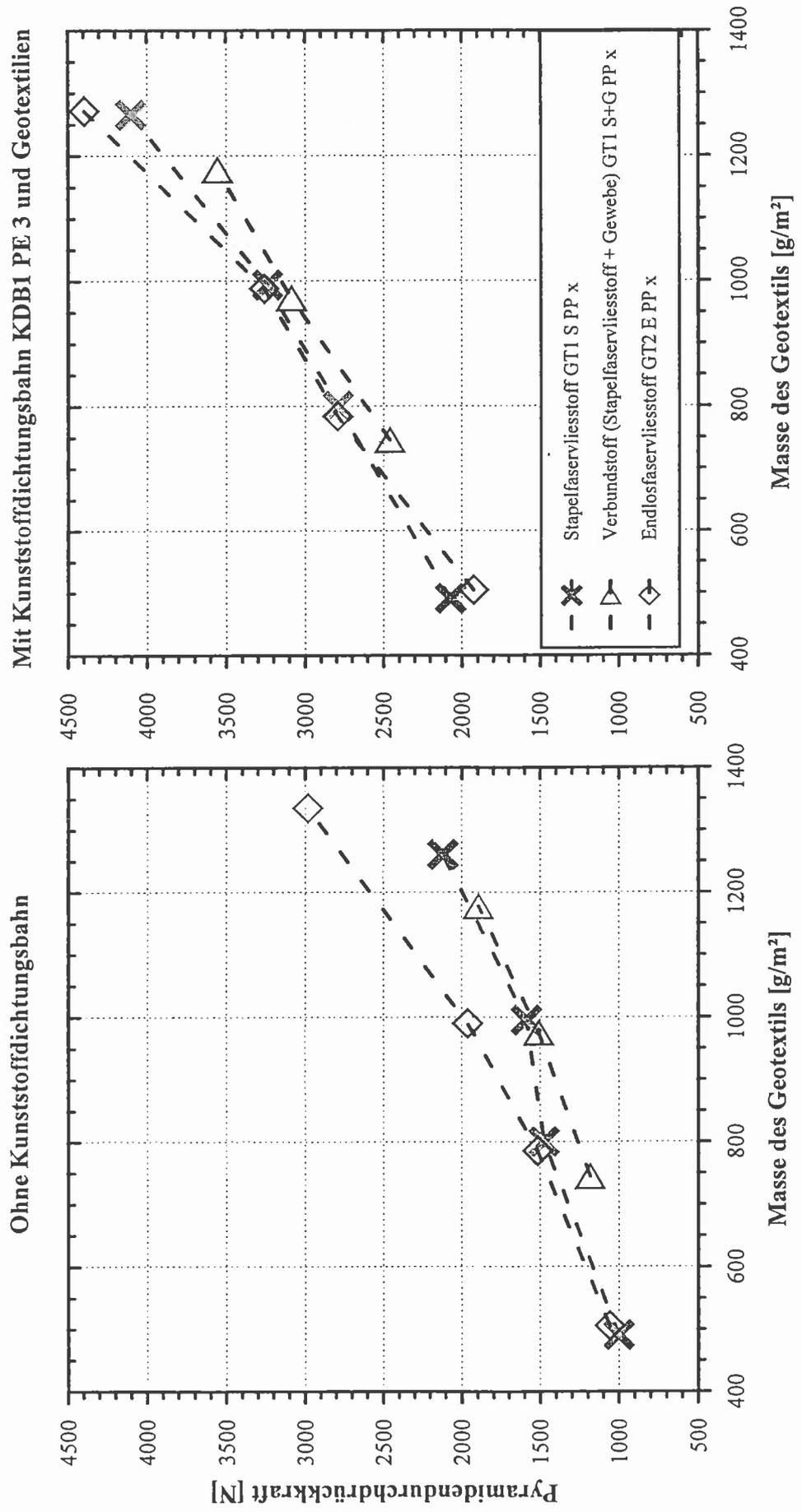
### Anl. 4.3: Ergebnisse weggesteuerter Durchdruckversuche an Einzelmaterialien

Probenbezeichnung	mittlere Masse in g/m <sup>2</sup>	mittlere Dicke in mm	Mittelwert	Pyramidendurchdruckkraft in N		Versuchs- anzahl
				Standard- abweichung	Mittelwert - Standardabweichung	
nur KDB						
KDB1 PE 2	2190	2,25	631	56	575	10
KDB1 PE 3	3033	3,19	834	59	775	10
KDB2 PE 2	1835	1,83	643	45	598	10
KDB2 PE 3	2991	3,01	1082	27	1055	5
KDB3 PVC2	2779	2,1	531	74	457	10
KDB3 PVC3	4191	3,3	872	58	814	10
nur GT						
GT1 S PP 500	490	5,1	1002	135	867	10
GT1 S PP 800	800	6,2	1475	173	1302	10
GT1 S PP 1000	995	6,6	1587	72	1515	5
GT1 S PP 1200	1260	9,5	2118	194	1924	10
GT1 S+G PP 700 (500+200)	745	6,3	1184	153	1031	10
GT1S+G PP 1000 (800+200)	975	5,6	1509	179	1330	10
GT1 S+G PP 1200 (1000+200)	1178	6,5	1896	197	1699	10
GT2 E PP 500	505	3,9	1060	50	1010	5
GT2 E PP 800	785	5,6	1517	200	1317	10
GT2 E PP 1000	990	5,8	1963	153	1810	10
GT2 E PP 1200	1335	8,5	2983	169	2814	10

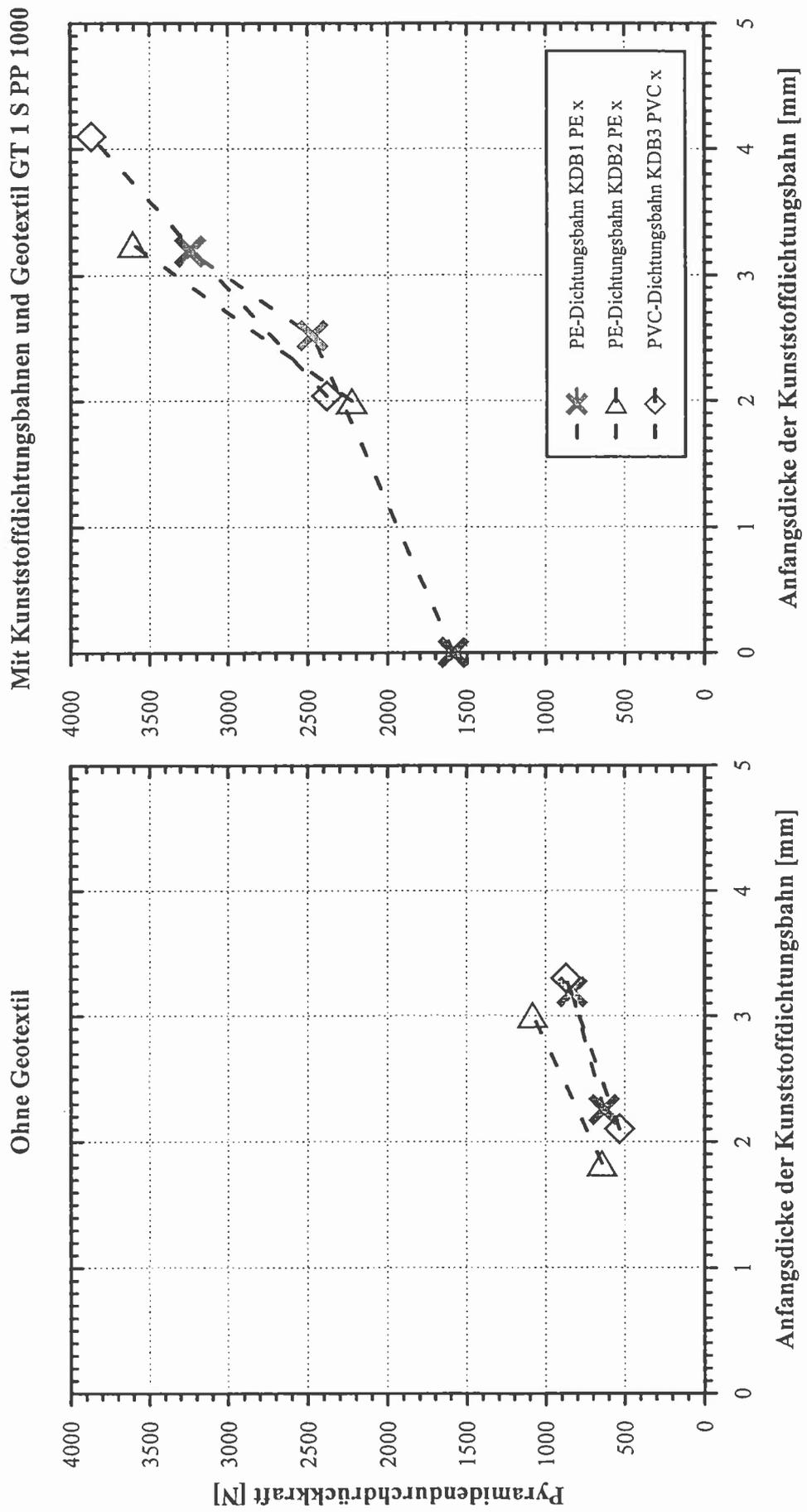
**Anl. 4.4: Ergebnisse weggesteuerter Durchdruckversuche an Probenpaketen aus Kunststoffdichtungsbahn und Geotextil**

Probenbezeichnung KDB/GT	mittlere Masse in g/m <sup>2</sup> KDB/GT	mittlere Dicke in mm KDB/GT	Mittelwert	Perforationskraft in N		Minimum	Versuchs- anzahl
				Standard- abweichung	Mittelwert- Standardabweichung		
KDB1 PE 2 / GT1 S PP 1000	2252+962	2,52+6,4	2472	226	2246	2230	5
KDB1 PE 2 / GT1 S+G PP 700 (500+200)	2188+746	2,25+6,3	2223	125	2098	2040	10
KDB1 PE 2 / GT1 S+G PP 1000 (800+200)	2188+973	2,25+5,6	2576	112	2464	2440	5
KDB1 PE 2 / GT1 S+G PP 1200 (1000+200)	2188+1178	2,25+6,5	3182	97	3085	3030	5
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 500	3033+491	3,19+5,1	2070	101	1969	1930	5
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 800	3033+800	3,19+6,2	2790	91	2699	2620	5
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	3033+994	3,19+6,6	3240	87	3153	3130	5
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1200	3043+1266	3,36+9,6	4102	195	3907	3820	5
KDB1 PE 3 / GT1 S+G PP 700 (500+200)	3033+746	3,19+6,3	2460	59	2401	2380	5
KDB1 PE 3 / GT1 S+G PP 1000 (800+200)	3033+973	3,19+5,6	3086	21	3065	3060	5
KDB1 PE 3 / GT1 S+G PP 1200 (1000+200)	3033+1178	3,19+6,5	3556	50	3506	3510	5
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 500	3033+505	3,19+3,9	1926	71	1855	1760	5
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 800	3033+784	3,19+5,6	2793	251	2542	2450	10
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 1000	3033+988	3,19+5,8	3260	201	3059	3000	10
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 1200	3036+1272	3,43+7,7	4396	273	4123	4190	5
KDB2 PE 2 / GT1 S PP 1000	1809+936	2,00+6,7	2228	189	2039	2070	5
KDB2 PE 2 / GT1 S+G PP 700 (500+200)	1835+746	1,83+6,3	2058	121	1937	1860	10
KDB2 PE 2 / GT1 S+G PP 1000 (800+200)	1835+973	1,83+5,6	2520	101	2419	2380	5
KDB2 PE 2 / GT1 S+G PP 1200 (1000+200)	1835+1178	1,83+6,5	2946	90	2856	2830	5
KDB2 PE 3 / GT1 S PP 1000	3038+938	3,25+6,5	3608	211	3397	3340	5
KDB2 PE 3 / GT1 S+G PP 700 (500+200)	2990+766	3,01+6,3	2842	100	2742	2710	5
KDB2 PE 3 / GT1 S+G PP 1000 (800+200)	2990+973	3,01+5,6	3414	106	3308	3240	5
KDB3 PVC 2 / GT1 S PP 1000	2692+987	2,04+6,6	2382	206	2176	2130	5
KDB3 PVC 2 / GT1 S+G PP 700 (500+200)	2779+780	2,06+6,7	2120	155	1965	1875	10
KDB3 PVC 2 / GT1 S+G PP 1000 (800+200)	2779+961	2,05+5,7	2468	123	2345	2255	10
KDB3 PVC 2 / GT1 S+G PP 1200 (1000+200)	2779+1192	2,06+6,1	3024	106	2919	2905	10
KDB3 PVC 3 / GT1 S+G PP 700 (500+200)	4191+767	3,27+6,7	2657	171	2486	2425	10
KDB3 PVC 3 / GT1 S+G PP 1000 (800+200)	4191+982	3,33+5,8	3494	166	3328	3205	10
KDB3 PVC 3 / GT1 S+G PP 1200 (1000+200)	4191+1196	3,25+6,7	4083	200	3883	3795	10
KDB3 PVC 4(2+2) / GT1 S PP 1000	5389+964	4,10+6,6	3870	99	3771	3780	5

**Anl. 4.5: Weggesteuerte Durchdrückversuche -  
Mittlere Durchdrückkräfte abhängig von der Masse des Geotextils für unterschiedliche Geotextilien**



Anl. 4.6: Weggesteuerte Durchdruckversuche -  
 Mittlere Durchdruckkräfte abhängig von der Anfangsdicke der Kunststoffdichtungsbahn für unterschiedliche Bahnen



## Anl. 4.7: Ergebnisse kraftgesteuerter Druckversuche mit variierten Kräften

Prüfdauer: nach Lastaufbringung 24 h oder bis zur Perforation

Prüfmateriale	Ver-suchs-anzahl	Druckkraft in		Masse GT in g/m <sup>2</sup>	Anfangsdicke in mm bei 2 kPa		Dicke in mm unter Druck-stempel nach <sup>2)</sup>			Dicke in mm nach Ausbau		Änderung Dicke KDB in mm			
		N	% <sup>1)</sup>		KDB	GT	Summe	1 min	15 min	1 h	24 h		KDB	GT	Summe
<b>Versuche mit KDB</b>															
KDB1 PE 3	2	75	9	-	3,46	-	2,22	2,16	2,12	2,05	nicht gemessen				
KDB1 PE 3	2	155	18	-	3,46	-	1,63	1,53	1,48	1,39	nicht gemessen				
KDB1 PE 3	2	230	28	-	3,46	-	1,19	1,07	1,01	0,92	nicht gemessen				
KDB1 PE 3	1	230 <sup>3)</sup>	28	-	3,00	-	1,11	1,00	0,94	0,85	nicht gemessen				
KDB1 PE 3	1	580	70	-	3,42	-	0,01	-0,14	-	-	Perforation				
KDB1 PE 3	1	580 <sup>4)</sup>	70	-	3,00	-	0,01	-	-	-	Perforation				
<b>Versuche mit GT</b>															
GT1 S PP 1000	2	150	9	1129	-	6,55	1,36	1,28	1,23	1,14	nicht gemessen				
GT1 S PP 1000	2	300	19	1129	-	6,55	0,93	0,87	0,84	0,78	nicht gemessen				
GT1 S PP 1000	2	450	28	1129	-	6,55	0,80	0,74	0,70	0,62	nicht gemessen				
GT1 S PP 1000	1	450 <sup>5)</sup>	28	1147	-	6,60	0,90	0,83	0,79	0,72	nicht gemessen				
GT1 S PP 1000	2	1130	71	1129	-	6,55	0,21	0,09	0,01	-0,14	Perforation				
GT1 S PP 1000	1	1130 <sup>6)</sup>	71	1111	-	6,50	0,00	-	-	-	Perforation				
<b>Versuche mit KDB und GT</b>															
KDB1 PE 2 / GT1 S PP 1000	2	250	10	989	2,37	6,60	8,97	2,68	2,56	2,50	2,34	1,8	1,1	2,9	rd. 0,6
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 500	2	195	9	505	3,45	5,50	8,95	2,75	2,64	2,58	2,45	2,6	0,5	3,1	rd. 0,9
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 800	2	270	10	845	3,45	6,35	9,80	3,20	3,06	2,99	2,85	2,7	0,9	3,6	rd. 0,8
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	2	315	10	1040	3,47	6,70	10,17	3,55	3,40	3,33	3,19	2,8	1,3	4,1	rd. 0,7
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	2	630	19	1040	3,46	6,70	10,16	2,72	2,54	2,45	2,25	2,6	1,1	3,7	rd. 0,9
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	2	945	29	1040	3,46	6,70	10,16	2,00	1,78	1,69	1,52	1,6	1,1	2,7	rd. 1,9
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	1	950 <sup>7)</sup>	29	1034	3,00	6,80	9,80	2,00	1,81	1,71	1,51	1,6	1,1	2,7	rd. 1,4
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	1	2360 <sup>8)</sup>	73	1046	3,00	6,60	9,60	0,41	0,08	0,00	-	-	Perforation		rd. 3,0
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	1	3150 <sup>9)</sup>	97	1046	3,00	6,60	9,60	-0,18	-	-	-	-	Perforation		rd. 3,0
KDB2 PE 3 / GT1 S PP 1200	2	445	11	1261	3,45	9,95	13,40	3,60	3,43	3,34	3,18	2,6	1,6	4,2	rd. 0,9
KDB2 PE 2 / GT1 S PP 1000	2	250	11	972	1,82	6,55	8,37	2,33	2,21	2,15	2,02	1,4	1,1	2,5	rd. 0,4
KDB2 PE 3 / GT1 S PP 1000	2	340	9	984	3,40	6,65	10,05	3,40	3,26	3,17	3,01	2,6	1,1	3,7	rd. 0,8

<sup>1)</sup> % der mittleren Durchdrückkraft aus Anl. 4.3 und 4.4 <sup>2)</sup> Die Zeitzählung beginnt mit Ende der Lastaufbringung.

<sup>3)</sup> bis <sup>9)</sup> Lastaufbringung in folgenden Stufen:

<sup>4)</sup> 30, 80, 130 und 230 N

<sup>5)</sup> 30, 100, 300 und 450 N

<sup>6)</sup> 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800 und 950 N

<sup>7)</sup> 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1100, 1500, 2000, 2500 und 3150 N

<sup>8)</sup> 30, 80, 130, 220, 350, 500 und 580 N

<sup>9)</sup> 30, 100, 300, 800 und 1130 N

<sup>4)</sup> 30, 80, 130, 220, 350, 500 und 580 N

<sup>5)</sup> 30, 100, 300, 800 und 1130 N

<sup>6)</sup> 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1100, 1500, 2000 und 2360 N

<sup>7)</sup> 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1100, 1500, 2000 und 3150 N

<sup>8)</sup> 30, 80, 130, 220, 350, 500 und 580 N

<sup>9)</sup> 30, 100, 300, 800 und 1130 N

### Anl. 4.8: Ergebnisse kraftgesteuerter Druckversuche mit variierten Prüfmaterialien

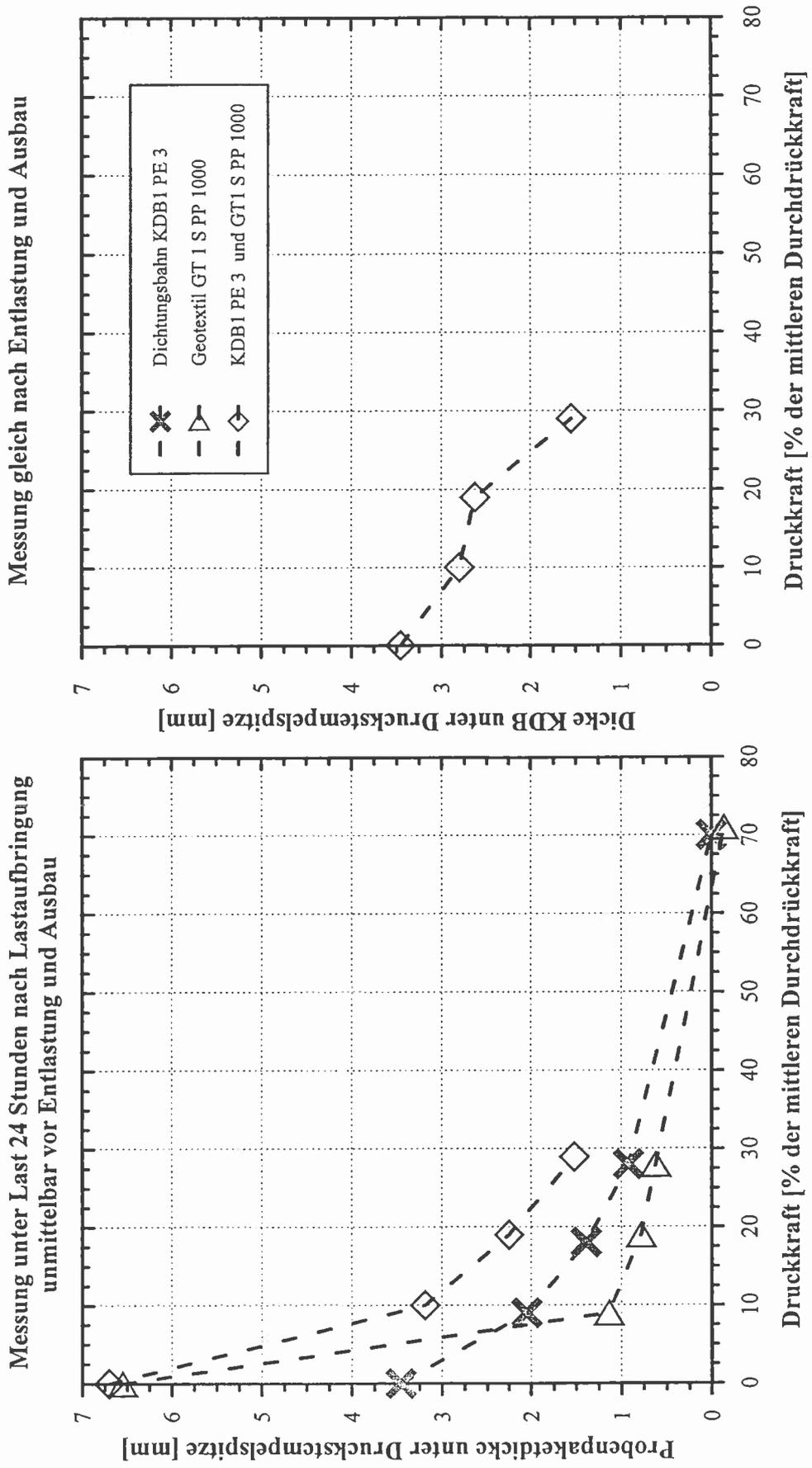
Druckkraft: 625 N

Prüfdauer: nach Lastaufbringung 24 h oder bis zur Perforation

Prüfmaterial	Ver- suchs- anzahl	Geotextil- masse in g/m <sup>2</sup>	Anfangsdicke in mm bei 2 kPa		Dicke in mm unter Druckstempel nach <sup>1)</sup> von			Restdicke in mm gleich nach dem Ausbau		Dickennä- derung in mm KDB			
			KDB	GT	Summe	1 min	15 min	1 h	24 h		KDB	GT	Summe
<b>Versuche mit KDB</b>													
KDB1 PE 2	2	-	2,57	-	-	0,00	-	-	-	Perforation	2,57		
KDB1 PE 3	2	-	3,54	-	-	0,00	-	-	-	Perforation	3,54		
KDB2 PE 2	2	-	2,03	-	-	0,00	-	-	-	Perforation	2,03		
KDB2 PE 3	2	-	3,35	-	-	0,41	0,15	0,05	0,00	Perforation	3,35		
KDB3 PVC 2	2	-	2,14	-	-	0,00	-	-	-	Perforation	2,14		
KDB3 PVC 3	2	-	3,16	-	-	0,00	-	-	-	Perforation	3,16		
<b>Versuche mit KDB und GT</b>													
KDB1 PE 2 / GT1 S PP 1000	2	1139	2,46	6,97	9,42	2,38	2,22	2,14	1,95	1,6	1,5	3,1	rd. 0,9
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 500	4	514	3,28	5,45	8,73	1,43	1,26	1,18	1,01	1,3	0,5	1,8	rd. 2,0
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 800	2	834	3,56	6,04	9,59	2,11	1,92	1,83	1,66	2,0	0,9	2,9	rd. 1,6
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1000	2	989	3,23	6,60	9,83	2,50	2,31	2,21	2,03	2,1	1,0	3,1	rd. 1,1
KDB1 PE 3 / GT1 S PP 1200	2	1250	3,55	9,78	13,33	3,12	2,94	2,84	2,63	2,4	1,5	3,9	rd. 1,2
KDB1 PE 3 / GT1 S + G PP 700	2	771	3,42	6,65	10,07	2,00	1,83	1,75	1,56	1,8	0,9	2,7	rd. 1,6
KDB1 PE 3 / GT1 S + G PP 1000	2	955	3,40	5,60	9,00	2,30	2,13	2,06	1,89	2,0	0,9	2,9	rd. 1,4
KDB1 PE 3 / GT1 S + G PP 1200	2	1214	3,56	5,85	9,41	2,97	2,81	2,73	2,56	2,5	1,5	4,0	rd. 1,1
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 500	2	499	3,58	3,87	7,45	1,43	1,26	1,17	0,98	1,7	0,5	2,2	rd. 1,9
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 800	2	813	3,54	5,78	9,32	2,06	1,85	1,75	1,53	1,9	0,9	2,8	rd. 1,6
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 1000	2	1071	3,37	6,15	9,52	2,44	2,23	2,11	1,87	1,9	0,9	2,8	rd. 1,5
KDB1 PE 3 / GT2 E PP 1200	2	1318	3,46	8,18	11,64	3,17	2,93	2,81	2,60	nicht gemessen			
KDB2 PE 2 / GT1 S PP 1000	2	1106	2,03	7,10	9,13	2,12	1,96	1,86	1,66	1,2	1,3	2,5	rd. 0,8
KDB2 PE 3 / GT1 S PP 1000	2	988	3,20	6,50	9,70	2,61	2,42	2,33	2,14	2,0	1,0	3,0	rd. 1,2
KDB3 PVC 2 / GT1 S PP 1000	2	969	2,08	6,46	8,54	1,57	1,42	1,33	1,13	0,7	1,0	1,7	rd. 1,4
KDB3 PVC 3 / GT1 S PP 1000	2	1010	3,12	6,45	9,57	2,20	1,94	1,81	1,55	1,0	1,0	2,0	rd. 2,1
KDB3 PVC 4(2 + 2)/ GT1 S PP 1000	2	981	4,18	6,35	10,53	3,01	2,76	2,63	2,33	2,0	1,3	3,3	rd. 2,2

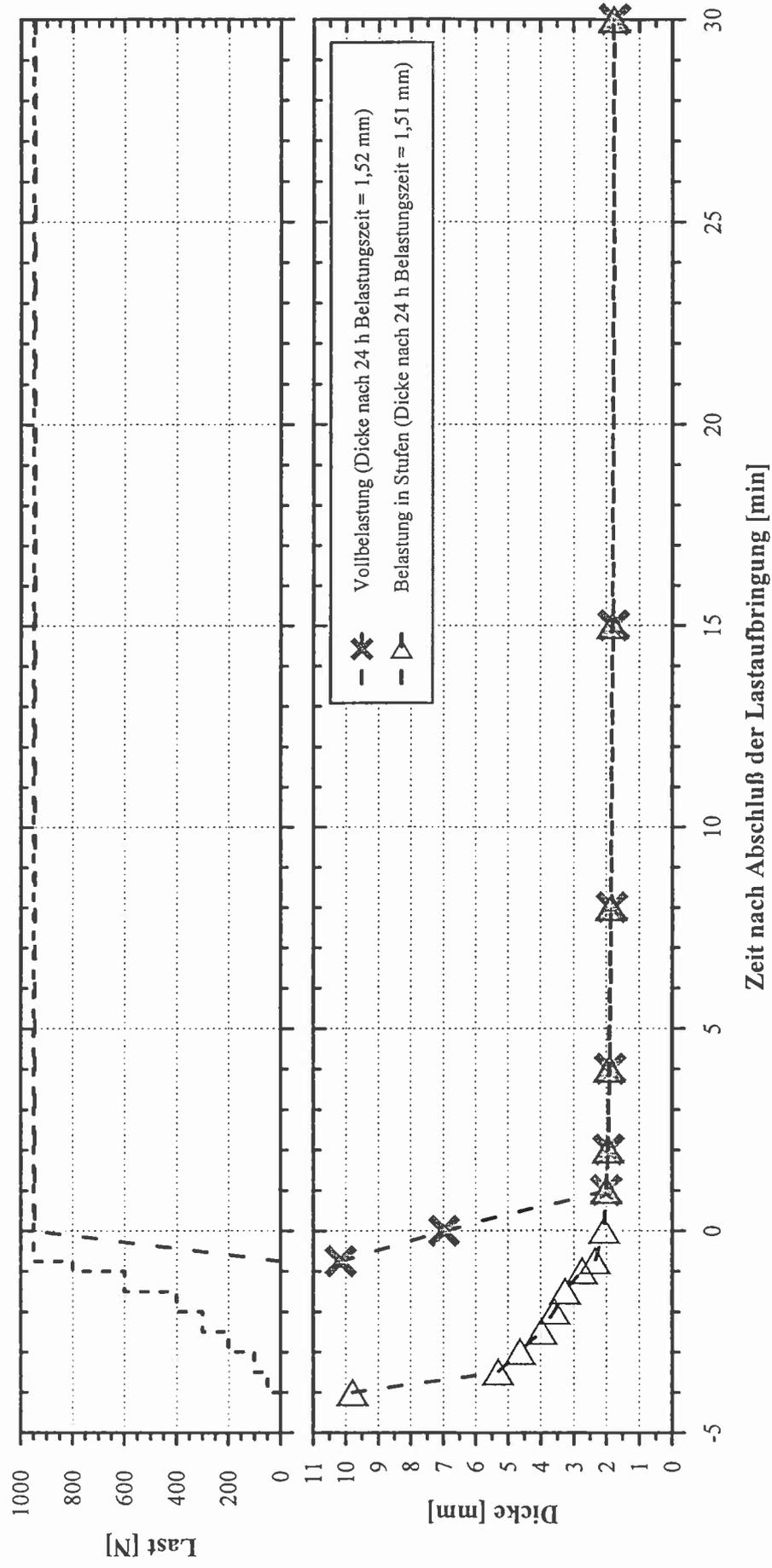
<sup>1)</sup> Die Zeitzählung beginnt mit Abschluß der Lastaufbringung.

Anl. 4.9: Kraftgesteuerte Druckversuche -  
 Proben- bzw. Probenpaketdicke unter der Druckstempelspitze abhängig von der Druckkraft



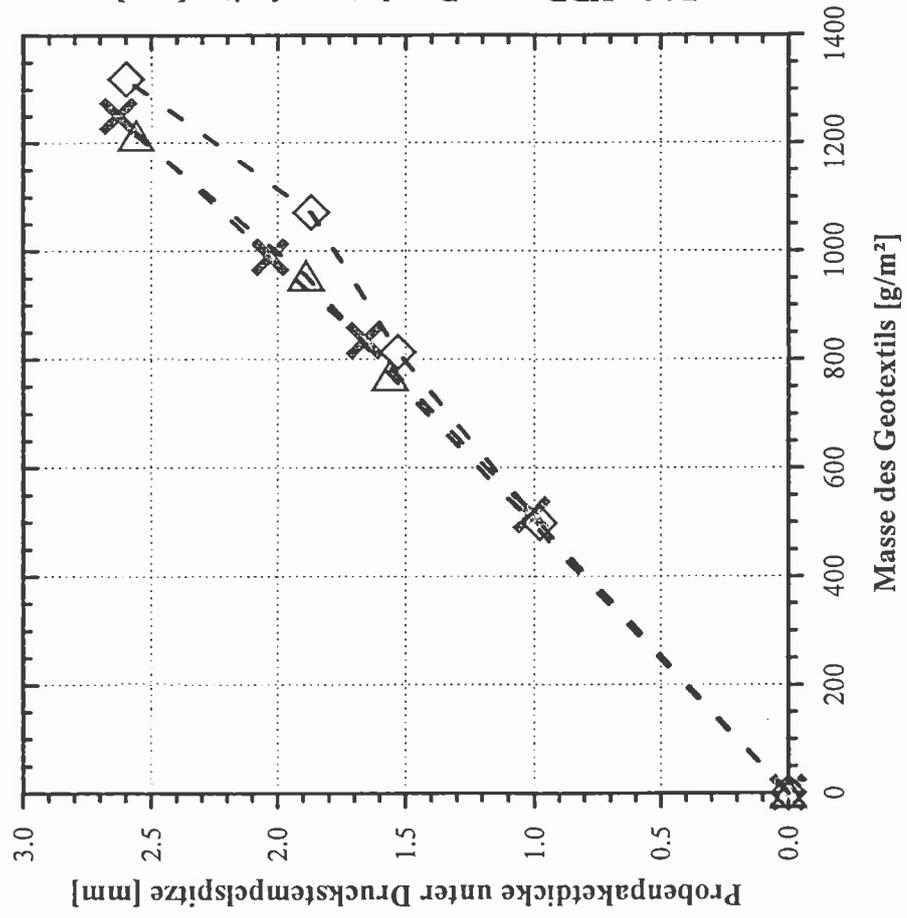
Anl. 4.10: Kraftgesteuerte Druckversuche -  
 Probenpaketdicke unter der Druckstempelpitze abhängig von der Zeit bei unterschiedlicher Belastungsart

Dichtungsbahn KDB1 PE 3 und Geotextil GT1 S PP 1000

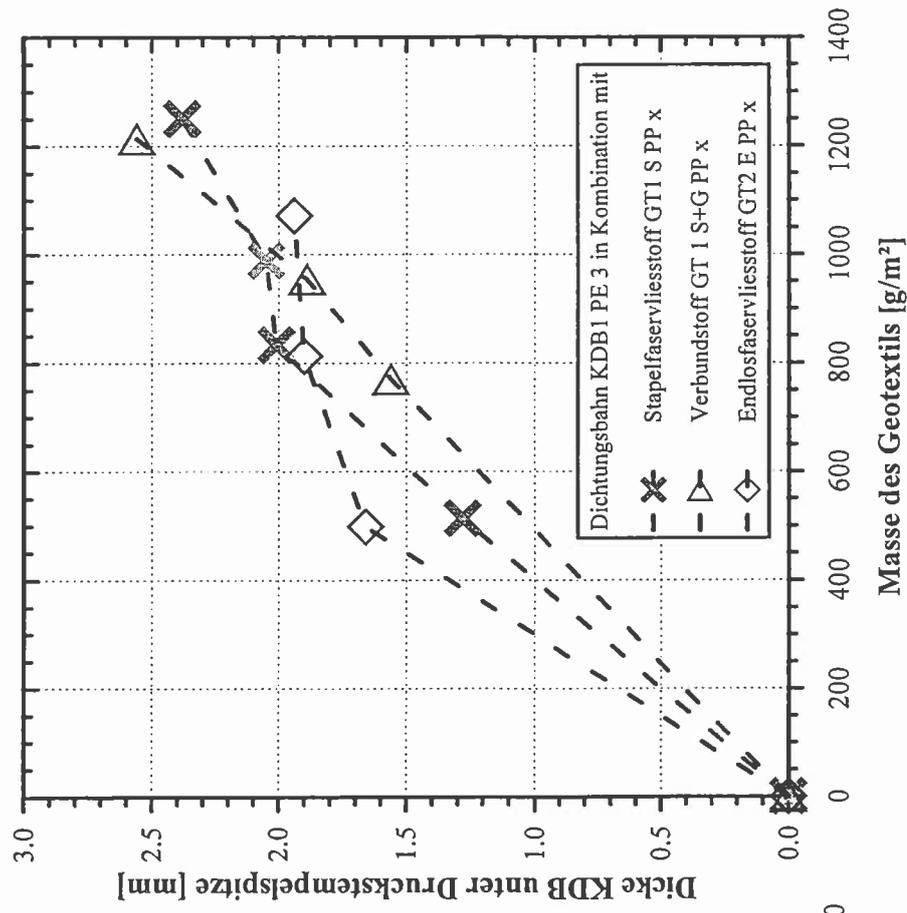


Anl. 4.11: Kraftgesteuerte Druckversuche - Proben- bzw. Probenpaketdicke unter der Druckstempelpitze abhängig von der Masse der geotextilen Schutzschicht für unterschiedliche Geotextilien bei konstanter Druckkraft von 625 N

Messung unter Last 24 Stunden nach Lastaufbringung  
unmittelbar vor Entlastung und Ausbau

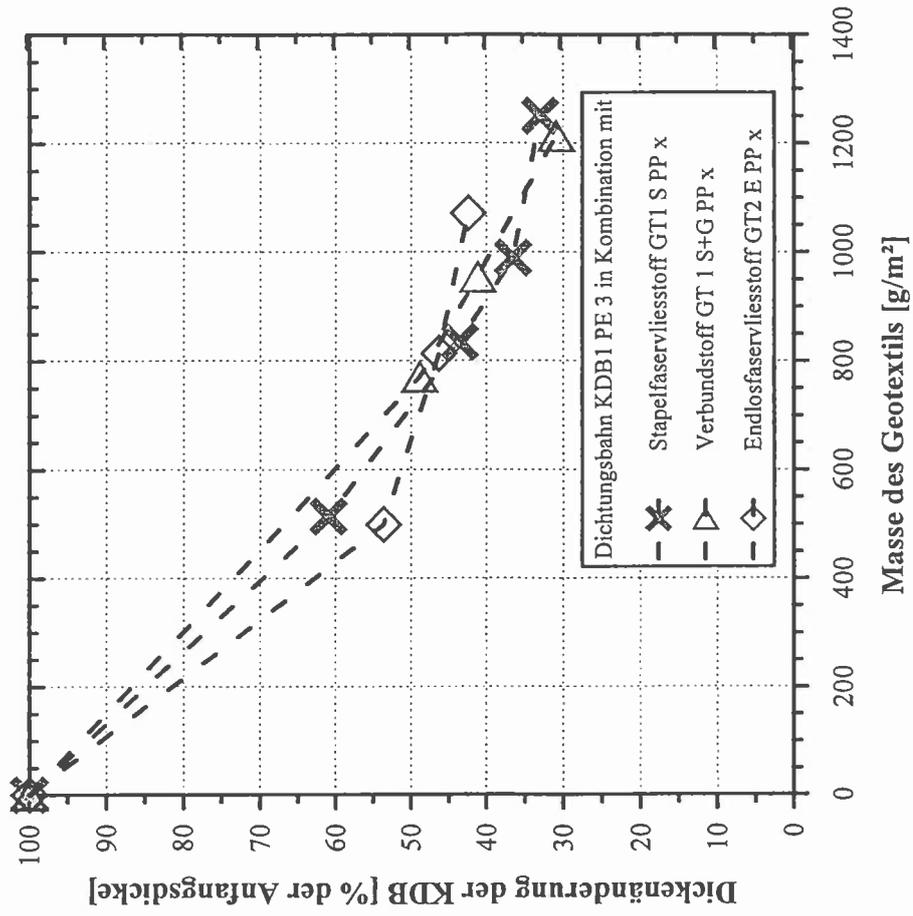
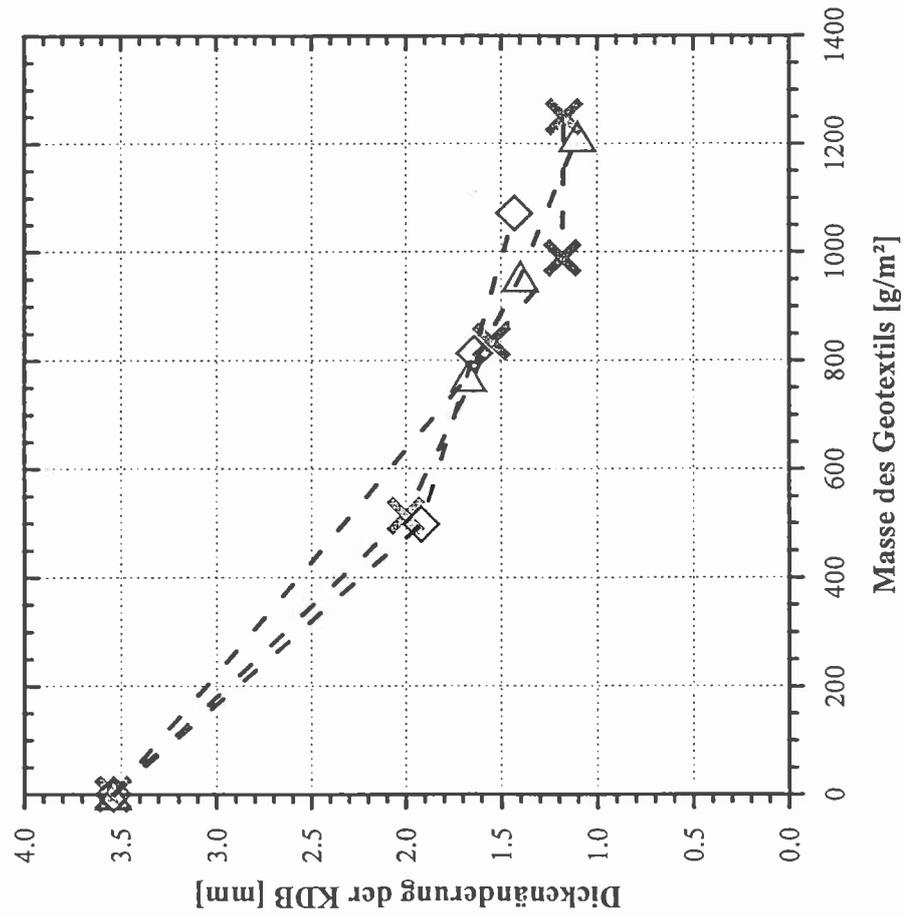


Messung gleich nach Entlastung und Ausbau



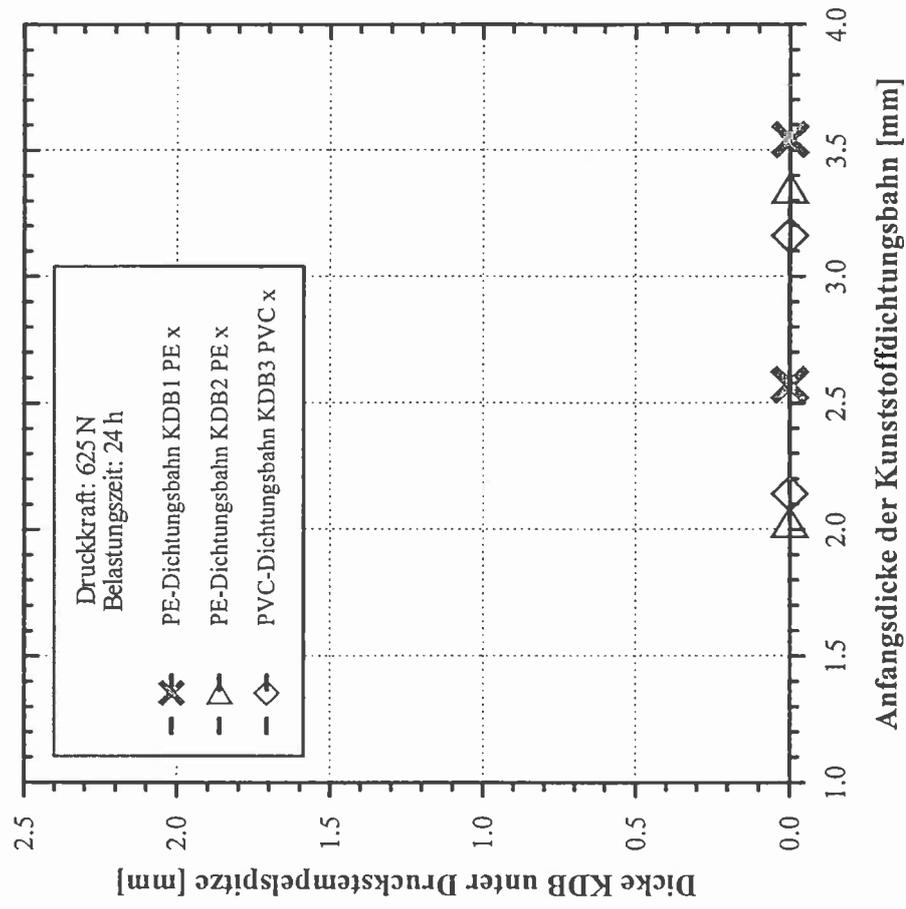
Anl. 4.12: Kraftgesteuerte Druckversuche - Dickenänderung der Dichtungsbahn unter der Druckstempelpitze abhängig von der Masse der geotextilen Schutzschicht für unterschiedliche Geotextilien gleich nach dem Ausbau

Druckkraft: 625 N  
Belastungszeit: 24 h

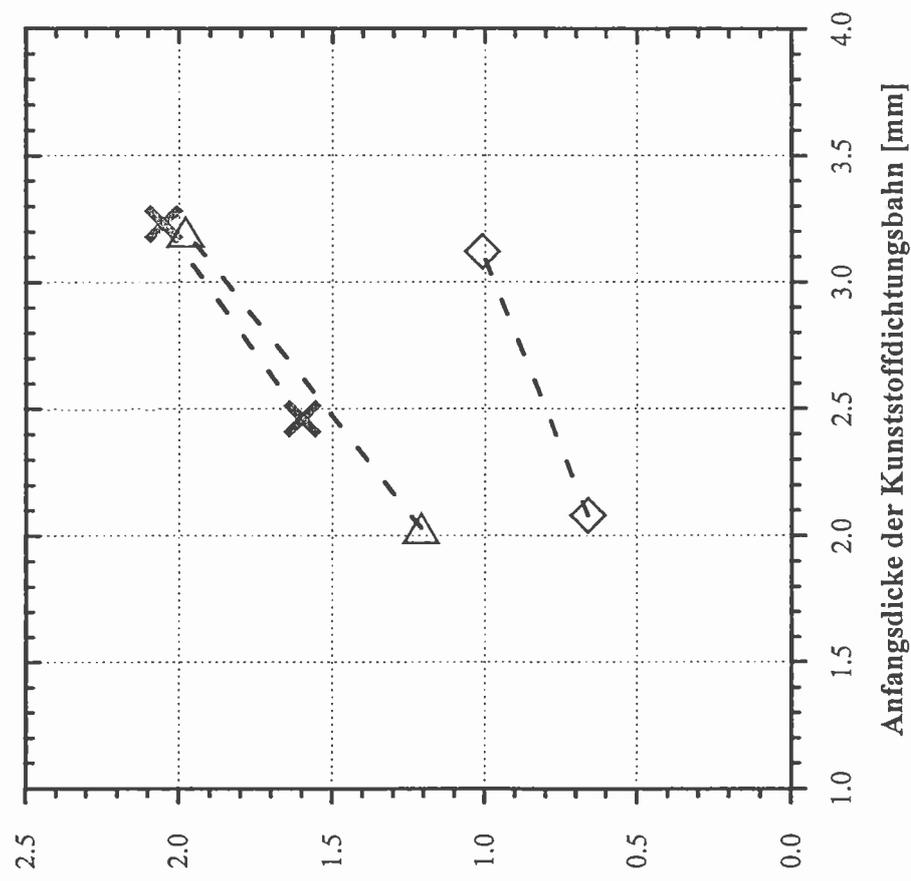


Anl. 4.13: Kraftgesteuerte Druckversuche - Dicke der Dichtungsbahn unter der Drucktempelpitze abhängig von der Anfangsdicke der Bahn für unterschiedliche Bahnen gleich nach dem Ausbau

Ohne Geotextil

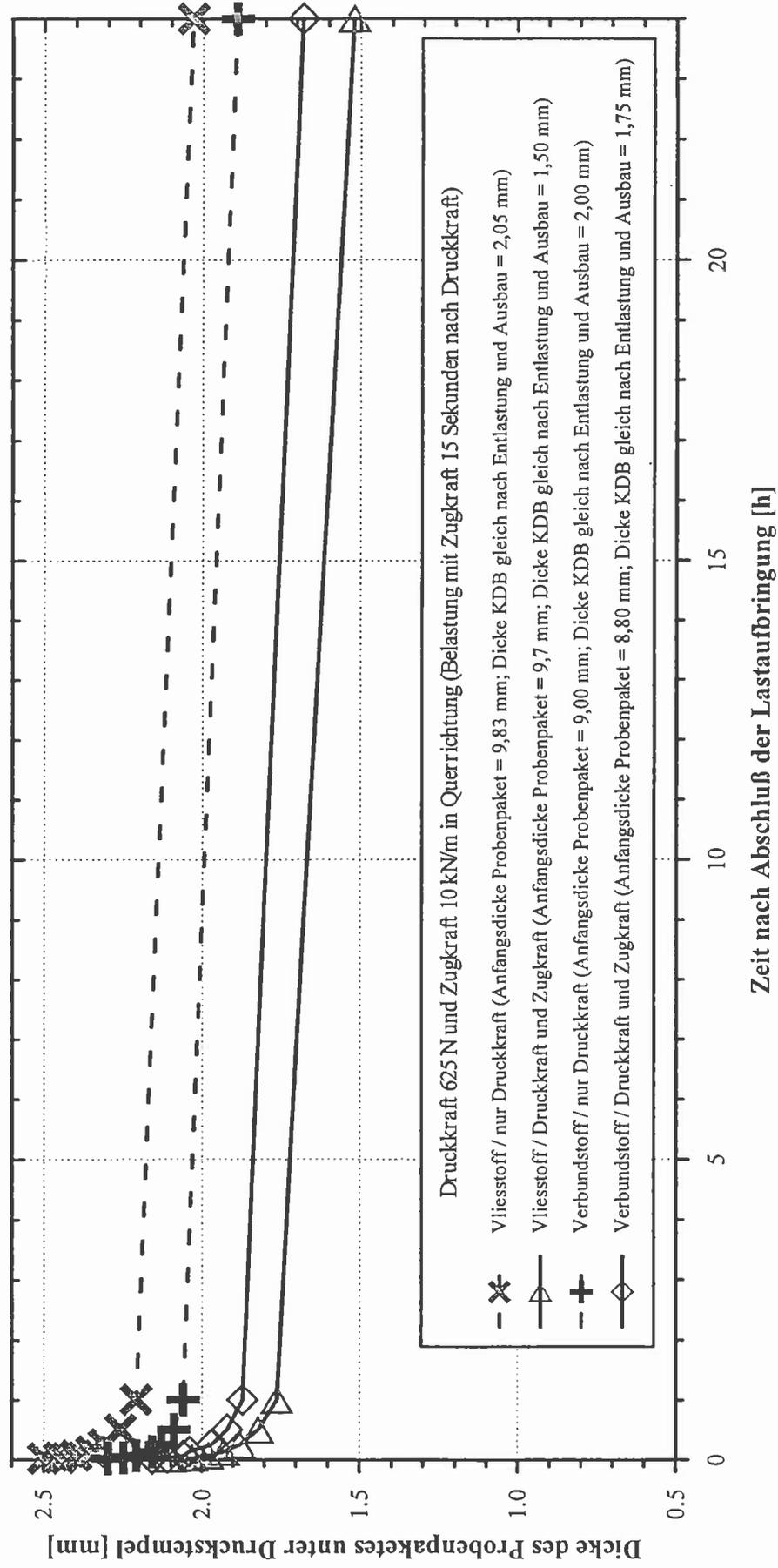


Mit Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextil GT 1 S PP 1000



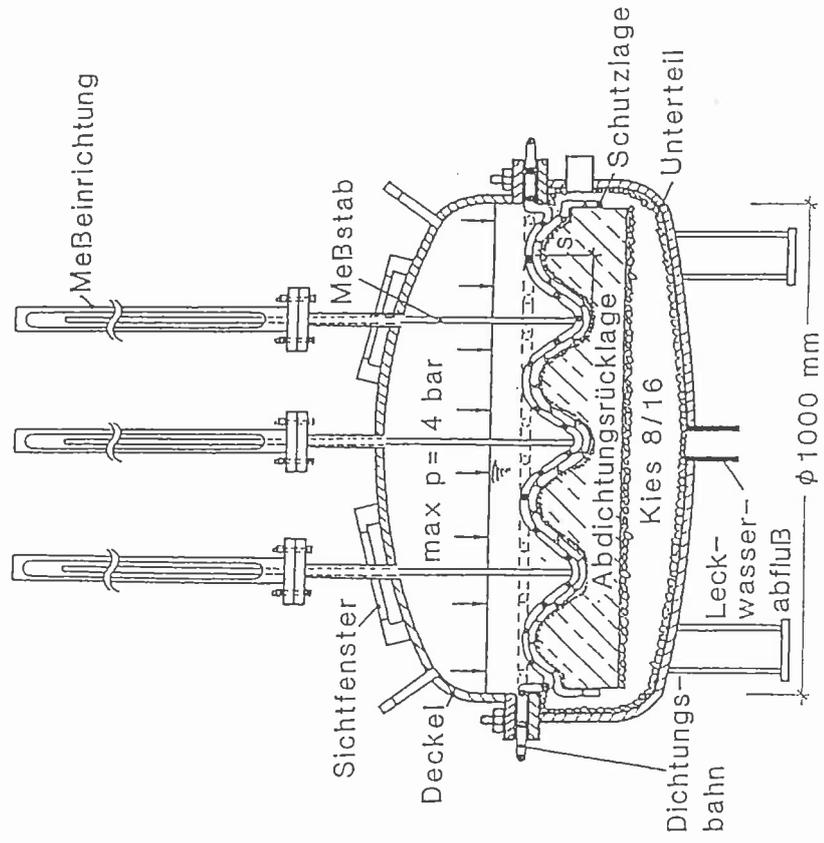
Anl. 4.14: Exemplarischer Vergleich von kraftgesteuerten Druckversuchen mit kraftgesteuerten Testversuchen mit Druck- und Zugbeanspruchung

Dichtungsbahn KDB1 PE 3 und Vliesstoff GT1 S PP 1000 oder Verbundstoff GT1 S+G PP 1000

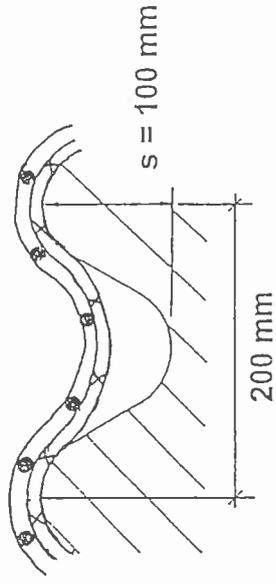


Anl. 5.1: Prinzipskizzen der Flächendruckversuche der STUVA

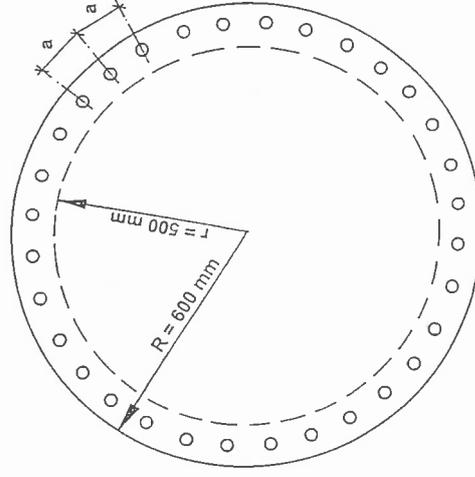
Versuchsaufbau im Brunnentopf



Detail Abdichtungsrücklage



Dichtungsbahnprüfstück



a = 110 mm, Lochabstand für Befestigungsbolzen  
 R = 600 mm, Radius der gesamten Probe  
 r = 500 mm, Radius der freien Probe

## Anl. 5.2: Randbedingungen und Ergebnisse der Flächendruckversuche

Versuchs-Nr.	Wasser- prüfdruck [bar]	Geotextil			Material	Nennstärke [mm]	Kunststoffdichtungsbahn						Einkerbung in die Kunststoff- dichtungs- bahn <sup>3)</sup> [mm]	Standzeit [Tage]
		Typ	Masse [g/m <sup>2</sup> ]	Art <sup>1)</sup>			Typ	Material	Dickennmessung		Minimale Restdicke <sup>4)</sup>			
									Mittlere Ausgangs- dicke <sup>2)</sup> [mm]	Mittlere Restdicke <sup>2)</sup> [mm]	[%] <sup>3)</sup>	[mm]		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	4	GT1SPP800	800	Stapel	KDB3PVC2	PVC	2	2,0	1,7	85	1,7	85	0,3	8
2	4	GT1SPP800	800	Stapel	KDB3PVC3	PVC	3	3,1	2,5	81	2,4	77	0,7	12
3	4	GT2EPP800	800	Endlos	KDB3PVC3	PVC	3	2,9	2,6	90	2,6	90	0,3	5
4	4	GT1S+G1000	1000	800 Stapel 200 Gewebe	KDB3PVC3	PVC	3	2,9	2,8	96	2,7	93	0,2	5
5	4	GT1SPP1000	1000	Stapel	KDB3PVC3	PVC	3	2,8	2,4	86	2,3	82	0,5	4
6	4	GT1SPP500	500	Stapel	KDB1PE3	PE	3	3,4	2,8	82	1,9	56	1,5	44
7a	2	GT2EPP500	500	Endlos	KDB1PE3	PE	3	3,0	2,9	97	2,8	93	0,2	4
7b	4	GT2EPP500	500	Endlos	KDB1PE3	PE	3	3,0	2,9	97	2,8	93	0,2	4
8	4	GT1SPP800	800	Stapel	KDB1PE3	PE	3	3,2	2,8	88	2,3	72	0,9	12
9	4	GT1SPP800	800	Stapel	KDB2PE3	PE	3	3,1	2,8	90	2,6	84	0,5	5
10	4	GT1S+G1000	1000	800 Stapel 200 Gewebe	KDB1PE3	PE	3	3,2	3,0	94	2,4	75	0,8	12

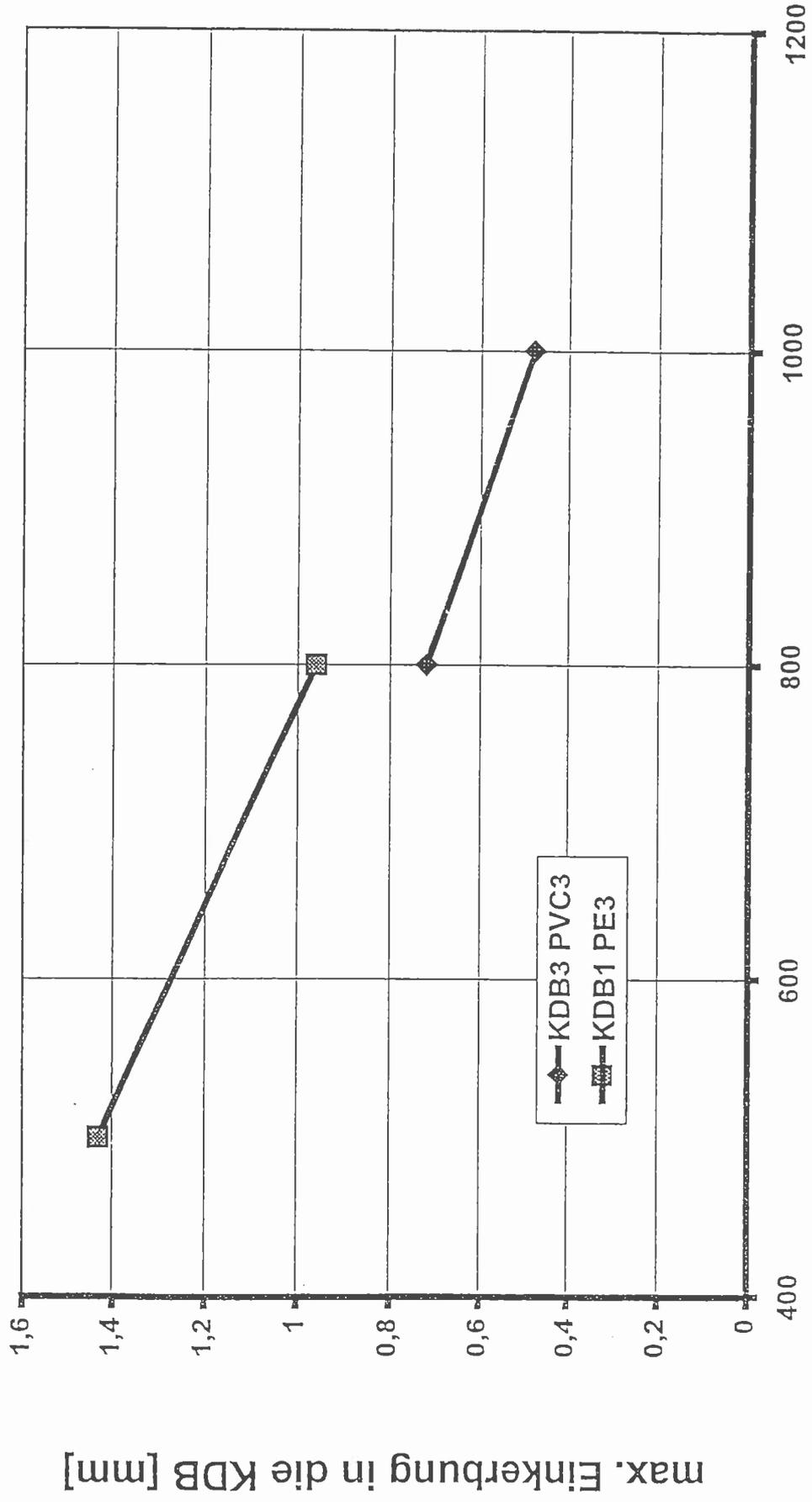
1): Alle Vliesstoffe der Geotextilien bestehen aus Polypropylen (PP), alle Verstärkungsgewebe der Geotextilien aus PEHD, Stapel = Stapelfaservliesstoff, Endlos = Endlosfaservliesstoff, Gewebe = einseitige Gewebeauflage

2): Mittelwert aus 10 Meßwerten

3): Bezogen auf die mittlere Ausgangsdicke der Kunststoffdichtungsbahn vor dem Versuch

4): Geringster Einzelwert, gemessen mit einem Meßstatorspitzendurchmesser von 1 mm

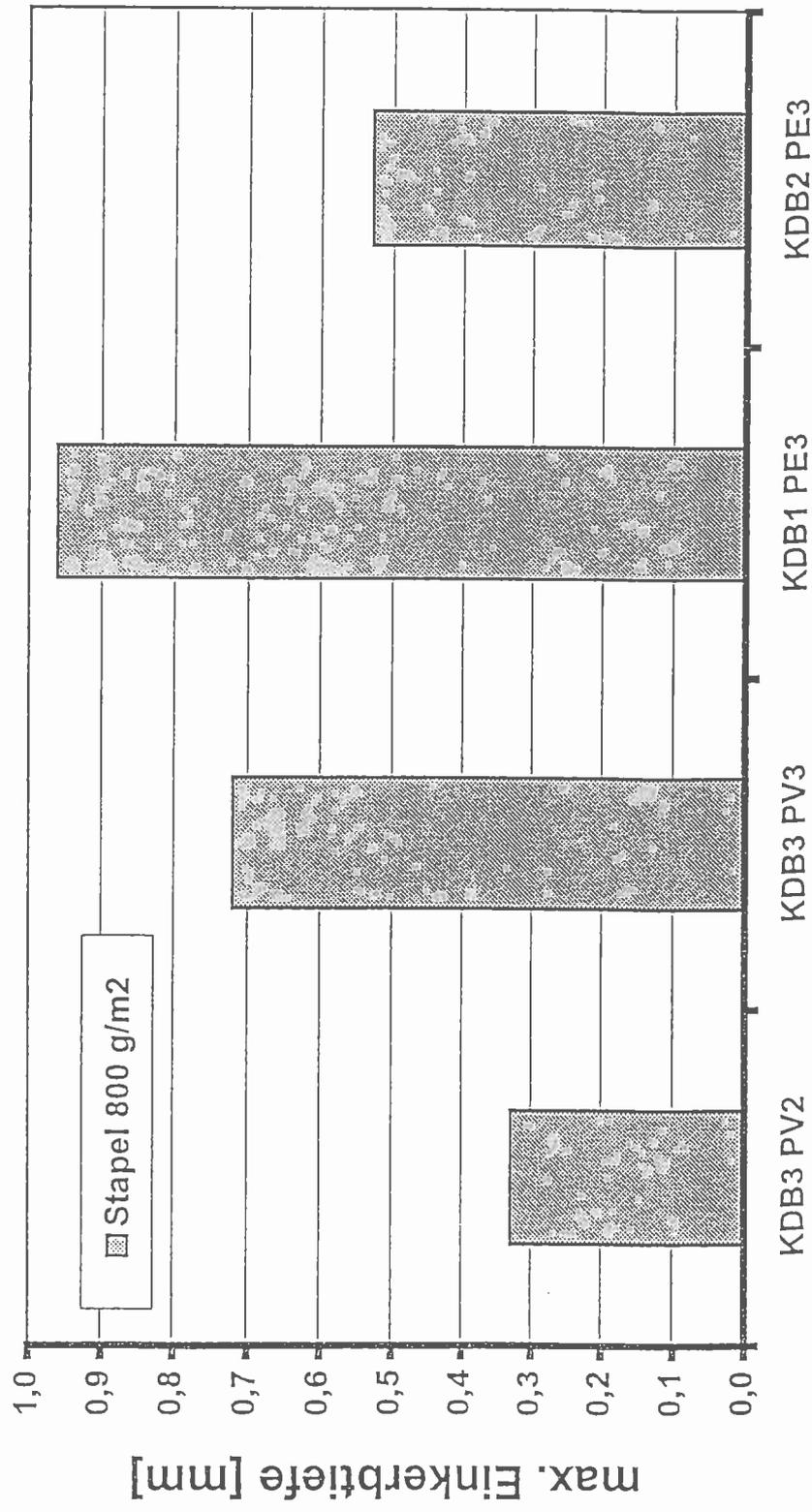
Anl. 5.3: Flächendruckversuche - Maximale Einkerbtiefe der Kunststoffdichtungsbahn abhängig von der Masse der Stapelfaservliesstoffe



Masse des Stapelfaservliesstoffs [g/m²]

max. Einkerbung in die KDB [mm]

Anl. 5.4: Flächendruckversuche - Maximale Einkerbtiefe der Kunststoffdichtungsbahn für variierte Geotextilien



Untersuchte KDB