

Mechanisches Verhalten lose verlegter PVCweich-Abdichtungen

Autor(en): **Poyda, Frank**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 25

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74518>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mechanisches Verhalten lose verlegter PVCweich-Abdichtungen

Von Frank Poyda, Köln

Einleitung

Kunststoffbahnen, insbesondere auf der Basis von weichgemachtem Polyvinylchlorid, finden in zahlreichen Fällen Anwendung bei der *Abdichtung unterirdischer Bauwerke*, insbesondere im *Gebirgstunnelbau*. Dies erfordert im Hinblick auf einen dauerhaften und wirkungsvollen Schutz gegen Sicker-, Hang-, Kluft- oder Grundwasser möglichst genaue Kenntnisse über ihr mechanisches Verhalten. So erscheinen auf theoretischem Sektor neue Berechnungsansätze zur Erfassung des Verformungsverhaltens unumgänglich, die vor allem den Einfluss der *Belastungszeit* berücksichtigen. In Verbindung mit der angestrebten Aussage über das Versagen von Kunststoffen werden ausserdem *materialgerechte Festigkeitshypothesen* benötigt. Die dazu erforderlichen Materialkennwerte müssen labor-mässig ermittelt werden. Zur Überprüfung der so gewonnenen Erkenntnisse sind darüber hinaus grossmassstäbliche Versuche praxisnah, d.h. mit den am Bauwerk üblichen handwerklich bedingten Unregelmässigkeiten durchzuführen. Unter Umständen ergeben sich daraus für die Theorie Korrekturfaktoren, die in die Berechnungen eingearbeitet werden müssen.

Allgemein ist davon auszugehen, dass im Kräftespiel zwischen Bauwerk und Abdichtung je nach Lage und Belastung unterschiedliche Spannungszustände auftreten. Die wichtigsten Beanspruchungsarten wurden bei der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (Stuva), Köln, in drei umfangreichen Versuchsreihen mit lose verlegten PVCweich-Dichtungsbahnen untersucht. Dabei kamen grossmassstäbliche Versuchskörper zur Anwendung. Auf diese Weise liess sich das mechanische Verhalten von Abdichtungen aus derartigen Bahnen mit oder ohne Schutzbahnen

- bei Schubbeanspruchung in der Abdichtungsebene,
- im Bereich langsam sich öffnender Bauwerksrisse,
- im Bereich von Bewegungsfugen und
- bei Linienflanschen

in enger Anlehnung an die Praxis wiedergeben. Die genannten Untersuchungen reihen sich in ein umfangreiches Gesamtprogramm zur Klärung aller wesentlichen Belastungszustände einer Hautabdichtung am Bauwerk ein. Grundsätzlich richten sich die Beobachtungen sowohl auf das *allgemeine Verformungsverhalten* als auch auf das *Bruchverhalten* der PVC-Dichtungsbahnen bei verschiedenartiger Verformung

und Belastung. Sie erfassten vier verschiedene Fabrikate ungerippten, unkaschierten Bahnenmaterials mit 1,5 mm Nenndicke:

Rhenofol, Braas+Co. GmbH, Mannheim, Wolfen, Chemische Fabrik Grünau GmbH, Illertissen, Trocal, Dynamit Nobel AG, Troisdorf, Ursuplast, Ursania Chemie GmbH, Hann.-Münden.

Die Dichtungsbahnen wurden in der Regel entsprechend den Verhältnissen an der Baustelle zwischen zwei Schutzbahnen lose und einlagig verlegt. Zu Vergleichszwecken wurden sie in einigen Versuchen auch ohne Schutzbahnen geprüft. Jedes der vier Dichtungsbahnenfabrikate gelangte in drei verschiedenen Abdichtungsaufbauten zur Anwendung. Als Schutzbahnen standen Bahnen aus Polyäthylen, aus härter eingestelltem PVCweich, aus gewebeverstärktem PVCweich sowie Kunststoffvliese auf Polyesterbasis zur Verfügung. Aufschluss über die Bahnenfolge im Abdichtungspaket gibt Tabelle 1.

Bei allen drei nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen wurden die aufgeführten Materialien unter den bereits erwähnten Bedingungen mechanisch geprüft. Dabei handelt es sich grundsätzlich um *kurzzeitige Versuche von wenigen Stunden Dauer*. Auf langzeitige Belastung - beispielsweise bis zu hundert Jahren als anzustrebende Lebensdauer von Tunnelbauwerken - können die Versuchsergebnisse wegen des *Alterungsvorgangs der organischen Abdichtungsmaterialien* daher nicht unmittelbar übertragen werden. So wurden beispielsweise chemische und biologische Prüfungen nicht mit in die Untersuchung einbezogen. Im wesentlichen liegt die Alterungsgefahr in der Weichmacherwanderung (Migration) verbunden mit einer Versprödung der Dichtungsbahnen. Zwangsläufig verändern sich dadurch die mechanischen Eigenschaften unter Umständen erheblich. Dieser Punkt sollte unbedingt durch geeignete Wahl der Dichtungsbahnen berücksichtigt werden.

Tabelle 1. Untersuchte Abdichtungsaufbauten aus PVCweich-Dichtungsbahnen mit und ohne beidseitige Anordnung von Schutzbahnen

Zeile	Fabrikat und Aufbau			
	A	B	C	D
o	1	2	3	4
1	obere Betonplatte PVCw-Bahn, 1,5 mm untere Betonplatte	obere Betonplatte PVCw-Bahn, 1,5 mm untere Betonplatte	obere Betonplatte PVCw-Bahn, 1,5 mm untere Betonplatte	obere Betonplatte PVCw-Bahn, 1,5 mm untere Betonplatte
2	obere Betonplatte PVC-Schutzbahn gewebeverstärkt PVCw-Bahn, 1,5 mm PVC-Schutzbahn gewebeverstärkt untere Betonplatte	obere Betonplatte Kunststoff-Vlies einseitig kaschiert PVCw-Bahn, 1,5 mm Kunststoff-Vlies untere Betonplatte	obere Betonplatte PE-Schutzbahn PVCw-Bahn, 1,5 mm PE-Schutzbahn untere Betonplatte	obere Betonplatte Kunststoff-Vlies PVCw-Bahn, 1,5 mm Kunststoff-Vlies untere Betonplatte
3	obere Betonplatte PVC-Schutzplatte PVCw-Bahn, 1,5 mm PVC-Schutzplatte untere Betonplatte	obere Betonplatte PVCw-Schutzbahn PVCw-Bahn, 1,5 mm untere Betonplatte	obere Betonplatte Kunststoff-Vlies PVCw-Bahn, 1,5 mm Kunststoff-Vlies untere Betonplatte	obere Betonplatte PE-Schutzbahn PVCw-Bahn, 1,5 mm Kunststoff-Vlies untere Betonplatte

Versuche zur Klärung des Schubverhaltens

Für die Schubversuche wurde als Probekörper ein *dreischichtiger Stahlbetonkörper mit zwei eingelagerten Abdich-*

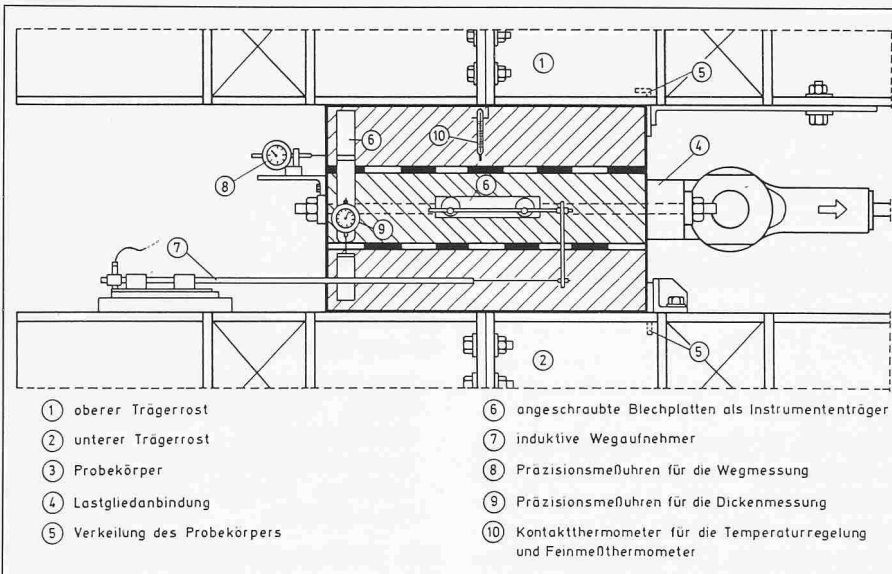


Bild 1. Seitenansicht des Probekörpers für Gleitversuche in Versuchsstellung nach Montage aller Messeinrichtungen

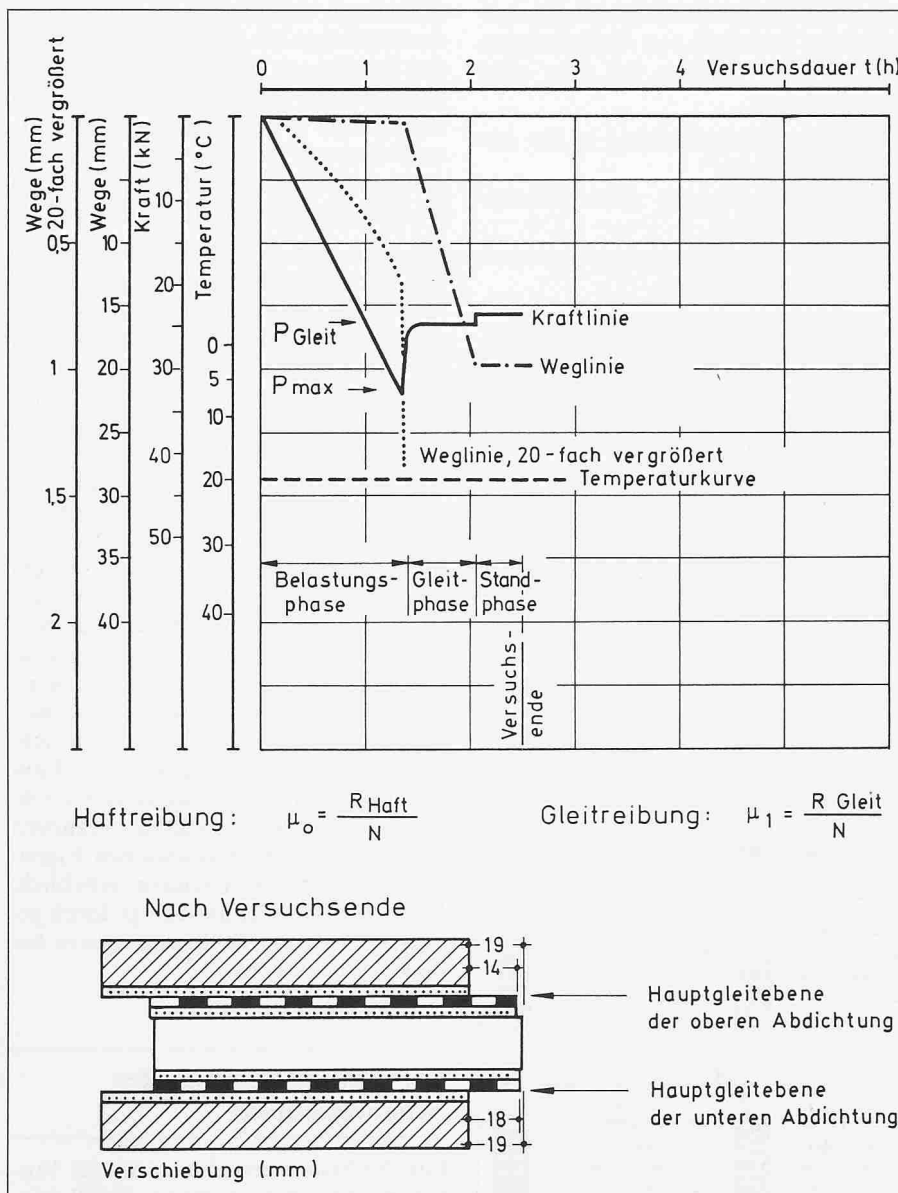


Bild 2. Versuchsablaufdiagramm am Beispiel eines Schubversuchs

tungspaketen hergestellt (Bild 1). So konnte auf eine bewegliche Lagerung mit ihren unkontrollierbaren Reibungskräften für den zu verschiebenden Probenteil verzichtet werden. Durch zwei durchlaufende zylindrische Kanäle in der Mittelplatte wurden für den Versuch zwei Spannstähle geführt, um die Zugkraft rückwärtig einzuleiten. Zur Kraftübertragung sind an der Rückseite der Mittelplatte zwei stählerne Ankerplatten angeordnet, gegen die sich die Spannstähle mit Muttern abstützen können. An der Vorderseite wird das Lastglied mit einem Gabelbock angeschlossen.

Für die angestrebte Versuchsaussage kam es besonders darauf an, in den Grenzflächen zwischen Abdichtung und Betonplatten genau den Zustand am Bauwerk nachzubilden. Die unten liegenden Betonplatten wurden daher auch nicht in ihrer abzudichtenden Fläche geglättet oder planeben abgerieben. Die oben liegenden Betonplatten wurden wie auf der Baustelle auf fertig verlegte Abdichtungsproben gegossen. Dadurch war ein vollflächiger, hohlraumfreier Kontakt zwischen den einzelnen Schichten gewährleistet.

Nach Anschluss aller Messgeräte und einer ausreichend langen *Vortemperaturung* begann der Versuch mit dem Aufbringen der Einpresskraft. Sie blieb über die gesamte Versuchsdauer konstant. Die Schubkraft wurde dann bei Null beginnend stufenweise in bestimmten Zeitabständen (alle 6 Min) gesteigert. Im Zuge der Lasterhöhung (*Belastungsphase*) verformte sich das Abdichtungspaket infolge Schubspannung, ohne jedoch eine Gleitbewegung zwischen den Schutz- und Dichtungsbahnen bzw. gegenüber den angrenzenden Betonplatten zu erfahren. Erst bei Erreichen einer maximalen Schubkraft rutscht die mittlere Betonplatte ruckartig in Richtung Zugkraft unter gleichzeitigem Absinken der Schubkraft. Danach kann sich die Schubkraft wieder aufbauen, ohne dass die Abdichtung gleitet. Wird die Maximalkraft wieder erreicht, dann rutscht die Probe erneut nach. Dieser Vorgang (auch *Stick-slip* genannt) kann sich mehrmals wiederholen, bis sich schliesslich ein gleichmässiger Gleitvorgang mit annähernd konstanter Gleitgeschwindigkeit einstellt. Die Schubkraft bleibt dabei deutlich unterhalb des Maximalwertes nahezu unverändert (*Gleitphase*). Wird die Schubkraft maschinentechnisch weiter gedrosselt, bleibt die Probe stehen (siehe dazu auch Bild 2).

Bei der Auswertung der Schubversuche bilden die *Maximalkraft der Belastungsphase* und die *Schubkraft der Gleitphase* zwei wichtige Merkmale im Belastungsdiagramm. Sie werden zur

Berechnung des *Haftreibungskoeffizienten* $\mu_0 = R_0/N$ und des *Gleitreibungskoeffizienten* $\mu_1 = R_1/N$ herangezogen. Bei organischen Werkstoffen sind diese Reibungskoeffizienten keine absoluten Konstanten, sondern von mehreren *Einwirkfaktoren* abhängig. In diesem Zusammenhang wurden als mögliche Einflussfaktoren auf das Gleitverhalten einer lose verlegten Kunststoffabdichtung zunächst folgende Punkte angesehen und daher auch versuchstechnisch erfasst:

- Einpressung
- Materialien und Aufbau der Abdichtung
- Versuchstemperatur
- Vorhandensein einer quer zur Zugrichtung verlaufenden Naht.

Bei idealen festen Körpern verhält sich die Reibungskraft grundsätzlich proportional zur Normalkraft. Der Proportionalitätsfaktor μ ist dabei eine Werkstoffkonstante und von den Kräften unabhängig. Beim vorliegenden System einer *mehrschichtigen Kunststoffabdichtung zwischen starren Betonplatten* befindet sich der organische Werkstoff jedoch nicht in einem absolut festen Aggregatzustand. Vielmehr weist er *auch zähflüssige Eigenschaften* auf, die keine Linearität im Sinne des Reibungsgesetzes ergeben. In Verbindung mit den hier betrachteten Abdichtungssystemen stellen daher die Reibungsbeiwerte keine Materialkonstanten dar.

Einpressung

Für drei Aufbaugruppen gibt Bild 3 den Bereich der im Versuch ermittelten Reibungsbeiwerte an. Die obere Begrenzung des jeweiligen Bandes wird durch die *Haftreibungsbeiwerte*, die untere durch die *Gleitreibungsbeiwerte* gebildet. Generell lässt die Darstellung eine monotone Abnahme der Reibungsbeiwerte mit zunehmender Einpressung erkennen. Die bandartigen Kurven fallen zunächst steil ab, werden dann aber mit grösserer Einpressung flacher. Möglicherweise nähern sie sich einer Asymptote parallel zur Abszisse.

Abdichtungsaufbauten

Von der Einpressung her gesehen liegt der für die Praxis wichtigste Bereich zwischen 0,1 und 0,5 MN/m². Hier ist die Veränderung der Reibungsbeiwerte über der Normalkraft zwar nicht mehr so gravierend. Es sind aber erhebliche Unterschiede in den Reibungsverhältnissen der einzelnen Abdichtungsaufbauten festzustellen. Bei Verwendung von PE-Schutzbahnen beiderseits der Dichtungsbahn sind sehr geringe Reibungskräfte zu erwarten, während bei PVCweich-Schutzbahnen etwa 3- bis 4fache Werte auftreten können.

In Abhängigkeit von der Einpressspannung σ_E lassen sich auf Grund der Versuche für fünf verschieden aufgebaute PVCweich-Abdichtungen Haft- und Gleitreibungsbeiwerte angeben. Im einzelnen handelt es sich wie erwähnt um lose verlegte ungerippte PVCweich-Dichtungsbahnen mit beidseitig angeordneten Schutzbahnen aus PVCweich, Kunststoffvlies oder Polyäthylen. Das gesamte dreischichtige Abdichtungspaket ist zwischen zwei zementgebundenen Schalen eingebettet. Die für eine Standsicherheitsberechnung des Bauwerkes nötigen Reibungsbeiwerte können je nach Einpressung und Abdichtungsaufbau dem Kapitel «Rückschlüsse und Empfehlungen für die Praxis» entnommen werden.

Temperatur

Als weiterer möglicher Einfluss auf das Reibungsverhalten von PVCweich-Abdichtungen wurde die Temperatur angesehen und entsprechend im Versuchsprogramm berücksichtigt. Jedoch konnte bei systematischer Auswertung kein gesetzmässiger Unterschied zwischen den Reibungsbeiwerten der bei 5 °C gefahrenen Versuche und denen der 20 °C-Versuche festgestellt werden. Zumindest für den Bereich der üblichen Gebrauchstemperaturen einer Bauwerksabdichtung, nämlich zwischen +5 und +20 °C kann somit eine Abhängigkeit des Reibungsverhaltens von der Temperatur ausgeschlossen werden.

Überlappnaht

Als letzter möglicher Einflussparameter auf das Gleitverhalten einer PVCweich-Abdichtung soll das Vorhandensein einer quer zur Schubbeanspruchung laufenden Überlappnaht näher unter-

sucht werden. Zu diesem Zweck sind die Reibungsbeiwerte μ_0 und μ_1 von acht Versuchen miteinander verglichen worden. Eine grundsätzliche Erhöhung der Reibung war dabei nicht zu erkennen. Die Naht bewirkt zwar durch die bereichsweise in der Dichtungsbahn vorgegebenen Materialverdopplung hinsichtlich der Normalkraft Spannungsunterschiede in der Einbettungsoberfläche, diese wirken sich jedoch nicht auf das Reibungsgesetz aus. Es wäre aber möglich gewesen, dass die nutförmige Aussparung in der Betonfläche mit ihren kleinen Absätzen vor und hinter einer Überlappnaht das Gleiten ganz ausschliessen oder doch zumindest behindern würde. Diese «Materialverzahnung» existiert aber nur in einer der verschiedenen Trennflächen. Alle anderen Trennflächen sind – Nahtversatz in den verschiedenen Schichten vorausgesetzt – dagegen weitgehend eben ausgebildet und entsprechend leichter verschieblich. Bei vier Versuchen fielen die Reibungsbeiwerte der Nahtversuche für μ_0 einmal grösser und dreimal kleiner und für μ_1 zweimal grösser und zweimal kleiner aus als in den Versuchen ohne Quernaht. Aufgrund dieser Beobachtung kann generell festgestellt werden, dass alle ermittelten Reibungsbeiwerte ohne Rücksicht auf Verbindungsnaht in den Dichtungsbahnen repräsentativ sind für den jeweilig untersuchten Abdichtungsaufbau.

Während der Versuchsdurchführung sind infolge der Belastung auch *Schäden* an den Abdichtungen aufgetreten. Sie wurden nach Ausbau der untersuchten Proben festgestellt und auf ihre Ursachen hin überprüft. Allgemein wurden Druckstellen, Gleitspuren, Stau-

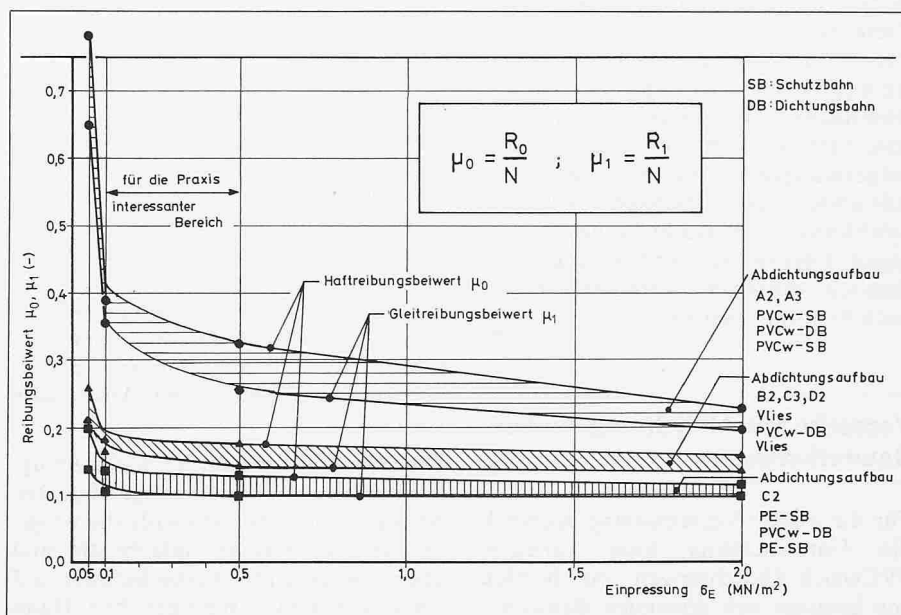


Bild 3. Reibungsbeiwerte für PVCweich-Abdichtungen mit beidseitig gleicher Schutzbahn in Abhängigkeit von der Einpressspannung

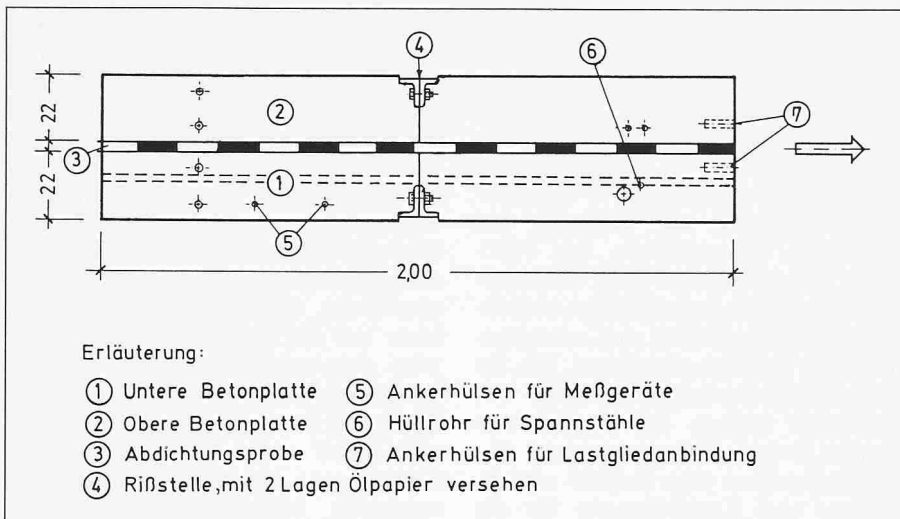


Bild 4. Schematische Darstellung des Probekörpers für die Rissüberbrückungsversuche

chungen und auch Perforationen beobachtet. Dabei lässt sich die Schadensursache bei der kombinierten Schub- und Druckbelastung nicht eindeutig einer Beanspruchungsart zuordnen. Vielmehr ist das Zusammenwirken von Flächendruck und Gleitverschiebung als Schadensgrund in den Versuch anzusehen.

Zu den verschiedenen *Abdichtungsaufbauten* ist folgendes anzumerken.

Bei den Abdichtungsproben *ohne* Schutzbahn zeigten sich mehrfach Perforationen in der Dichtungsbahn schon bei den hier betrachteten kurzzeitigen Belastungen. Abdichtungen mit beiderseitig angeordneten Schutzschichten hingegen zeigten im allgemeinen ausser geringfügigen Oberflächenveränderungen keine gravierenden Mängel, die eine Undichtigkeit zur Folge hätten. Diese Beobachtung unterstreicht die wichtige Aufgabe der beiderseitig angeordneten Schutzschichten. Zu den verschiedenen untersuchten Schutzsystemen ist anzumerken, dass Schutzvliese nur wenige Veränderungen aufweisen. Sie lassen einerseits Druckstellen und Gleitspuren wegen der filzigen Oberfläche nicht erkennen, andererseits passt sie sich aber auch gut den aufgezwungenen Verformungen an. Alle anderen Schutzbahnen aus Polyvinylchlorid und Polyäthylen liessen hingegen Gleitspuren und Druckstellen deutlich erkennen, vereinzelt traten auch Perforationen auf.

Versuche mit Abdichtungen über Bauwerksrissen

Für die zweite Versuchsreihe, nämlich die Untersuchung loser verlegter PVCweich-Abdichtungen im Bereich *von langsam sich öffnenden Bauwerksrissen* wurde ein zweischichtiger Stahlbetonkörper mit den Abmessungen

$L/B/H = 200 \text{ cm}/80 \text{ cm}/45 \text{ cm}$ mit zwischenliegender Abdichtungsprobe gewählt (Bild 4).

Bezüglich der *Rissform* mussten im Versuch folgende Vereinfachungen getroffen werden. Generell verlief der Riss im Probekörper *quer zur Zugrichtung und mittig bezogen auf die Längsachse des Probekörpers*. Idealisierend wurde eine ebene, glatte, geradlinig ausgerichtete Rissfläche ohne Versatz angenommen.

Bei der Herstellung der Ober- und Unterplatte wurde der Betonvorgang genau an der Rissstelle unterbrochen. Diese Massnahme sollte sicherstellen, dass beide Hälften der oberen und unteren Betonplatte im Rissbereich vollständig voneinander getrennt sind, so dass sich die Beanspruchungen an der Rissstelle allein auf die Abdichtung konzentrieren.

Der Probekörper besteht somit im wesentlichen aus vier einzelnen Stahlbetonplatten, die durch die horizontale Abdichtungsschicht und durch die vertikale Rissfuge voneinander getrennt sind. Aus versuchstechnischen Gründen wurde das vordere Blockpaar auf einer Schaukelkonstruktion horizontal verschieblich, das hintere dagegen auf Schraubenwinden unverschieblich, gelagert. Die bewegliche Lagerung des vorderen Probekörperteils ermöglichte bei Einwirken der Vorschubkraft die Rissöffnung. Die Anbindung des Lastgliedes zur Einleitung der Vorschubkraft setzte in beiden vorderen Betonplatten den Einbau einer Ankerhülse voraus.

Die Durchführung der Versuche erfolgte nach einem speziell ausgearbeiteten Ablaufschema. Zuerst wurde die vorgesehene Einpresskraft aufgebracht und über die gesamte Versuchsdauer auf einem konstanten Wert gehalten. Dann wurde bei Null beginnend der Riss im Probekörper schrittweise in regelmässi-

gen Zeitabständen von zwölf Minuten langsam geöffnet. Die Schrittweite belief sich in der Regel auf 2 mm. Damit erhält man eine Rissöffnungsgeschwindigkeit von 10 mm/Stunde. In den meisten Versuchen wurde jeweils mit 50 aufeinander folgenden Dehnstufen der Riss auf insgesamt 100 mm geöffnet. Im Hinblick auf die Praxis erscheint die gewählte Rissöffnungsgeschwindigkeit sehr hoch. Verbunden mit einer äusserst starken Aufweitung des Risses bis auf 100 mm sollten damit jedoch bewusst überhöhte Anforderungen an die Werkstoffe erzielt werden. So liegen die Versuchsergebnisse gegenüber den Verhältnissen am Bauwerk auf der sicheren Seite.

Mit zunehmender Rissöffnung stieg allgemein auch die Zugspannung in der Abdichtung an. Dabei verhielt sich die Zugspannung jedoch nicht proportional zur Rissöffnung. Dieser Umstand beruht auf dem *Relaxationsverhalten der Kunststoffbahnen*. Unter dem Begriff der Relaxation versteht man den *zeitabhängigen Spannungsabfall bei Stoffen mit Flieseigenschaften ohne Verformungsänderung*. Im Versuch war die Relaxation der Kunststoffbahnen zwischen den einzelnen Verformungsschritten deutlich zu erkennen. Während der genannten 12-minütigen Zeitspanne einer Dehnstufe sank die Zugkraft, ohne dass eine Rückverformung aufgebracht wurde. Jedoch verringerte sich wegen der stets anwachsenden freien Dehnlänge die Zuwachsrate je Verformungsschritt.

Für die Beurteilung einer lose verlegten Kunststoffbahnenabdichtung im Bereich eines sich langsam öffnenden Bauwerksrisses kann zunächst die Dehnung in der Abdichtung als ausschlaggebende Grösse angesehen werden. Sie ergibt sich aus der Abstandsvergrößerung der beiden Rissufer und aus der wirksamen Dehnlänge, die sich beiderseits der Risslinie in die Abdichtungsfläche erstreckt. Die Ausdehnung dieser Dehnzone ist von den Materialeigenschaften, von der Höhe der Einpressung und gegebenenfalls von konstruktiven Massnahmen wie z.B. Tellerankern und Nähten abhängig.

Um den Einfluss der Einpressung und einer parallel zur Risslinie verlaufenden Naht in der Dichtungsbahn zu ermitteln, wurde mit einem Abdichtungsaufbau jeweils ein Versuch bei 0,1 bzw. 1,0 MN/m² Einpressung sowie mit und ohne Überlappnaht in der Dichtungsbahn gefahren. Alle übrigen Versuchsbedingungen blieben unverändert. In Bild 5 sind diese Versuche gegenübergestellt. Bei einem Vergleich der Werte bei 5 cm Rissöffnung (noch keine Schäden an der Abdichtung) wird deutlich, dass die grössere Einpressung gegenüber der

kleineren eine grössere Dehnung sowie eine grössere Zugkraft in der Dichtungsbahn bewirkt. Zugkraft $P_{5\text{cm}}$ und Dehnung $\varepsilon_{m5\text{cm}}$ sind in den Versuchen 2, 12 und 13 grösser, als in den Versuchen 3, 18 und 19. In allen genannten Fällen betrug die Belastungszeit bei 5 cm Rissweite 5,0 Stunden. Die grössere Einpressung verursacht eine kleinere Dehnlänge und somit bei gleicher Rissweite von 5 cm eine grössere Dehnung in der Abdichtung. Durch die Anordnung einer quer zur Zugrichtung und damit parallel zur Risslinie verlaufenden Überlappnaht wird die mittragende Breite bzw. die Dehnlänge nochmals verkürzt. Die mittlere Dehnung und die Zugkraft bei 5 cm Rissweite steigt dadurch im Versuch 7 gegenüber Versuch 2 erneut an.

Bei Bewertung der Versuchsergebnisse ist zu beachten, dass alle in den Versuchen ermittelten Daten naturgemäss einer gewissen *Streuung* unterliegen. Das liegt in hohem Masse schon allein darin begründet, dass trotz gewisser Vereinfachungen bewusst noch *weitgehend praxisnahe Bauwerksverhältnisse* beibehalten wurden. Insbesondere die handwerklich bedingten Unregelmässigkeiten bei der Bauausführung bzw. bei der Probenherstellung nehmen einen starken Einfluss auf das Auswertungsergebnis. So erschwert die Rauigkeit der angrenzenden Betonoberflä-

chen mit Unebenheiten bis zu einigen Millimetern sowohl theoretische als auch experimentelle Ansätze zur Ableitung genauer mathematischer Beziehungen zwischen den aufgezählten Einflussfaktoren und den mechanischen Verformungen. Deshalb lässt sich das mechanische Verhalten einer lose verlegten Kunststoffabdichtung ausschliesslich auf theoretischem Wege nicht erschöpfend klären. Es fehlt die Möglichkeit einer genaueren Sicherheitsabschätzung des Rechenergebnisses gegenüber der Praxis.

Während der Versuche wurde auch die Probendicke überprüft. Sie nimmt bei Einleiten der Auflast deutlich ab und verändert sich mit zunehmender Belastungsdauer nur noch unwesentlich. Für die Bemessung einer Bauwerkskonstruktion dürfte diese Verformung von maximal 2 bis 3 mm bedeutungslos sein. Selbst bei statisch unbestimmten Systemen dürften sich derartige Verformungsmasse in der Regel kaum auf den Standsicherheitsnachweis auswirken. Im Hinblick auf die Funktion einer Abdichtung ist das genannte Zusammendrückungsmass jedoch nicht von vornherein vernachlässigbar. Liegen beispielsweise Sandkörner auf der Abdichtungsunterlage oder ragen Betongrate von wenigen Millimetern Höhe aus der Fläche heraus, so dringen diese bei Zusammendrückung der Schutzbahnen

u.U. in die Dichtungsbahn und können dort zu Perforationen führen. Diese Gefahr erhöht sich, wenn zusätzlich Gleitverschiebungen eintreten. Im Zuge des Gleitvorgangs können beispielsweise vorspringende Unebenheiten im Schutzbeton oder ein Sandkorn auf der Abdichtungsunterlage in der Abdichtungshaut Druckstellen verursachen. Um nun unvermeidliche Unregelmässigkeiten in den angrenzenden Bauteilen genügend auszugleichen, müssen die Schutzbahnen bestimmte Anforderungen erfüllen. Je nach Art der Schutzbahn muss bei Vliesen eine ausreichende Dicke, bei Schutzbahnen ein entsprechender Perforationswiderstand sichergestellt sein. Anderenfalls können im Laufe der Zeit Körner oder Steinspitzen durch die Schutzbahn hindurch in die eigentliche Abdichtungshaut dringen mit der Gefahr einer Undichtigkeit. Bei der Wahl eines geeigneten Schutzvlieses ist nicht dessen Dicke im unbelasteten Zustand massgeblich, sondern wegen der materialabhängigen unterschiedlichen Zusammendrückbarkeit die Dicke in dem zu erwartenden Belastungszustand. Einen Überblick über die Dicke der hier geprüften Abdichtungsaufbauten mit Schutzbahnen gibt Bild 6. Dort sind Ausgangsdicke und ihre prozentuale Änderung infolge Aufbringen der Einpresskraft aufgetragen. Bei einer Einpressung von 1 MN/m² werden danach Abdichtungs-

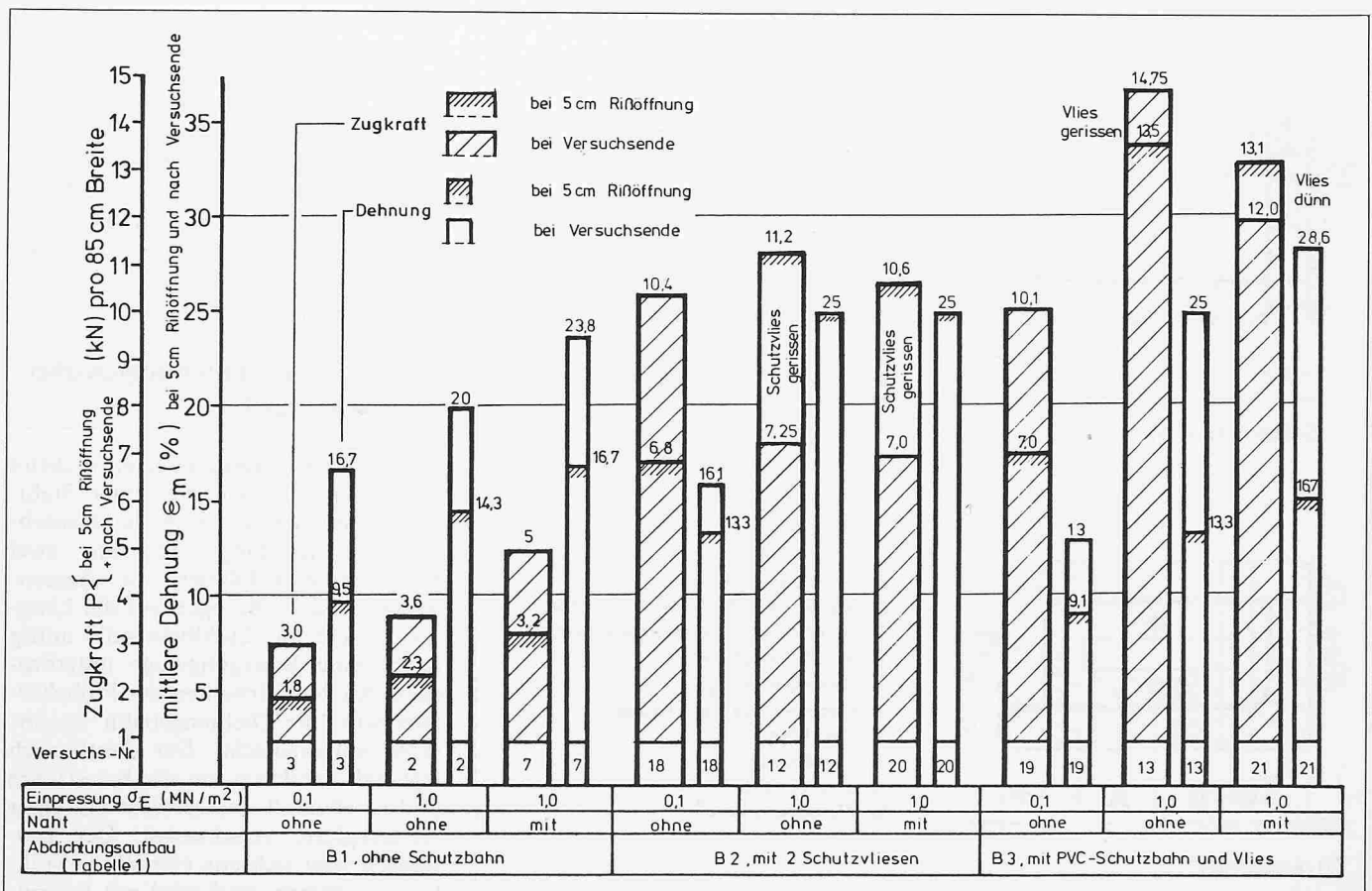


Bild 5. Vergleich von Rissüberbrückungsversuchen bei 0,1 und 1,0 MN/m² Einpressung mit und ohne Überlappnaht in der Dichtungsbahn

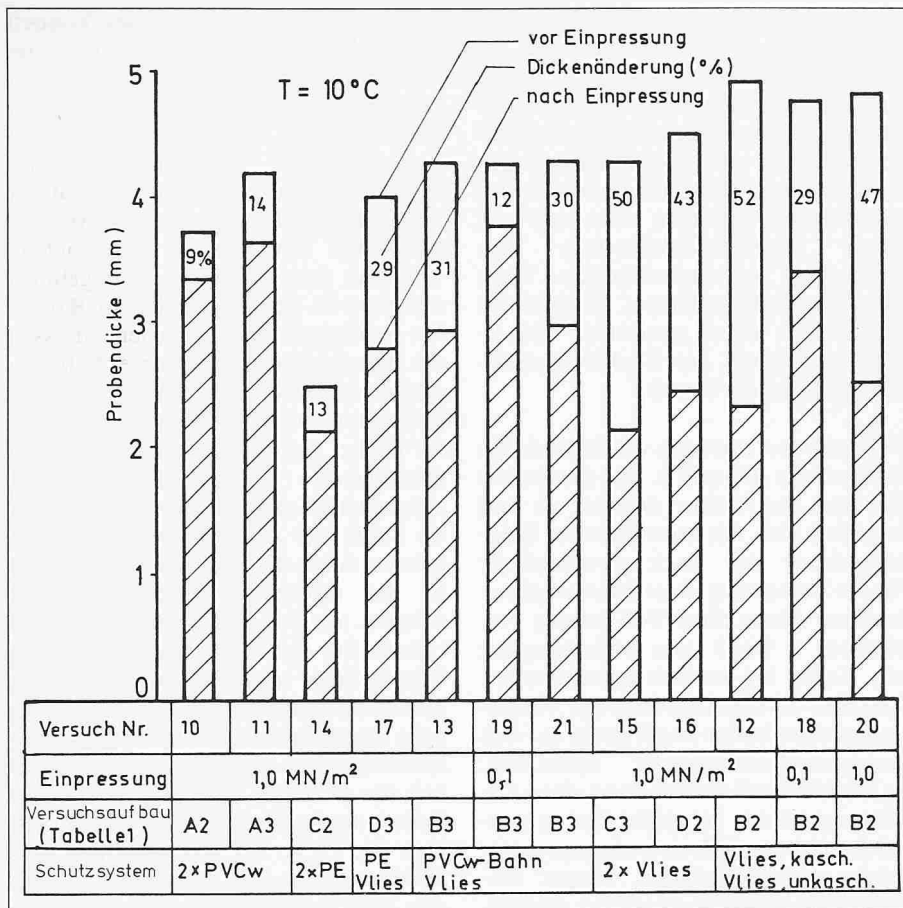


Bild 6. Dicke aller geprüften Abdichtungsaufbauten mit Schutzbahnen vor und nach Aufbringen der Einpressung

aufbauen mit PVC- bzw. PE-Schutzbahnen etwa zwischen 10 und 15% zusammengedrückt. Werden demgegenüber zwei Schutzvliese im Abdichtungspaket angeordnet, erhöht sich die prozentuale Zusammendrückung beträchtlich. In den Versuchen betrug sie 43 bis 52% bei einem Flächengewicht der einzelnen Vliese zwischen 2,2 und 2,9 N/m². Da sich die PVCweich-Dichtungsbahnen bei Einwirken der hier diskutierten Flächenlasten nur um wenige Hunderstel Millimeter, praktisch also gar nicht zusammendrücken, trägt die Dickenänderung allein der Vliese bei einer Einpressung von 1 MN/m² weit über 50%. Abdichtungsaufbauten mit einem Schutzvlies kombiniert mit einer PVC- bzw. PE-Schutzbahn zeigten eine prozentuale Dickenabnahme zwischen den beiden zuvor betrachteten Abdichtungsgruppen. Die Veränderung betrug in den Versuchen 13, 17 und 21 bei 1 MN/m² Einpressung etwa 30%. Es ist generell anzumerken, dass alle Zahlenangaben an die Versuchsanordnung gebunden sind und keine reinen werkstoffspezifischen Daten darstellen. Insbesondere das Zusammenwirken der verschiedenen Schichten im Abdichtungsaufbau untereinander und mit den angrenzenden oberflächenrauen Betonplatten ist in die Versuchsergebnisse integriert.

Abschliessend sei kurz auf *Schädigungen* in den Dichtungsbahnen eingegangen. Im rissnahen Bereich konnten bei Abdichtungsaufbauten ohne Schutzbahnen infolge Einpressung Perforationen festgestellt werden. Selbst bei schon relativ kleinen Einpresserspannungen von 0,1 MN/m² zeigten ungeschützte Dichtungsbahnen punktförmige Löcher, die durch den Dehn- und Gleitvorgang aufgeweitet wurden. Geschützte Dichtungsbahnen hingegen wiesen keinerlei Durchlöcherung auf.

Versuche mit Abdichtungen über Bauwerksfugen

Der für diese Untersuchung entwickelte Probekörper besteht aus einer Stahlbetonröhre, um die sich die Hautabdichtung herumlegt, und aus zwei Stahlbetonwinkelplatten als Aussenschale (Bild 7). Bezogen auf die Längsachse sind alle Stahlbetonteile mittig durch eine Bewegungsfuge unterbrochen. An den Stirnseiten des Probekörpers wird die Dichtungsbahn wasserdicht eingeflanscht. Der Festflansch legt sich bandartig um die Betonröhre und ist ebenfalls wasserdicht mit einer Abdeckplatte verschweisst. Der Losflansch setzt sich aus vier Winkelstücken zusammen, und wird mit Schrauben gegen den Festflansch angezogen.

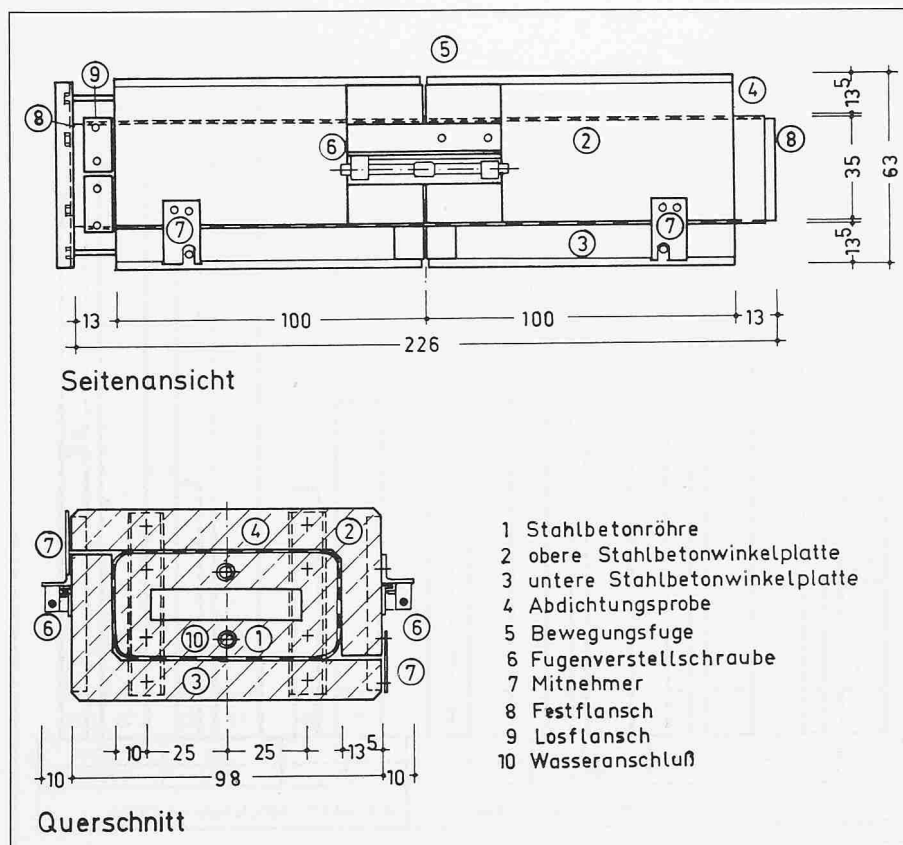


Bild 7. Schematische Darstellung des Probekörpers mit Bewegungsfuge

Während des Versuchsablaufs sollte sich die Fugenverformung über den gesamten Querschnitt gleichmässig einstellen. Das heisst, die Fuge sollte an jeder Stelle gleich weit geöffnet sein. Zu diesem Zweck wurden die Einzelteile der vorderen und der hinteren Probekörperhälfte jeweils für sich getrennt durch Mitnehmereinrichtungen an den Stirnflächen und Längsseiten in Längsrichtung unverschieblich miteinander verbunden. Durch diese Massnahme gliedert sich der Probekörper in zwei Blöcke mit zwischenliegender Bewegungsfuge. Die Fugenverformung erfolgte über seitlich angeordnete Führungsschienen mit Spindeltrieb. Ein speziell dafür vorgesehenes Lochraster ermöglichte eine horizontale, eine vertikale und eine unter 45° geneigte Fugenverschiebung. Die Bewegungsfuge läuft durch alle Stahlbetonteile mit einer Ausgangsfugenbreite von 1 cm. Eine Fugenkammer wie etwa bei bitumenverklebten Abdichtungen wird in der Praxis bei lose verlegten Kunststoffabdichtungen normalerweise nicht vorgesehen. Die Fugenkanten sollten jedoch zur Vermeidung von Schneideffekten abgefast werden (Bild 8). Auf Füllkörper in der Fuge, beispielsweise aus Schaumplatten, konnte beim Probekörper, anders als in der Praxis wegen der Verwendung von Fertigteilen, verzichtet werden. Ein Fugenblech stützt die Abdichtung gegen den Wasserdruk.

Die Versuche begannen jeweils mit dem Einleiten der Einpresskraft. Danach wurde der Wasserdruck mit 2 bar (= 20 m Wassersäule) auf die Abdichtung aufgebracht und zusammen mit der hydraulischen Einpressung über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Die Fuge wurde bei einem Ausgangsspalt von 1 cm beginnend alle sechs Minuten stufenweise jeweils um 5 Millimeter weiterverformt. Das ergibt eine mittlere Verformungsgeschwindigkeit von 50 mm/h. In den meisten Versuchen wurde die Fuge in 20 aufeinanderfolgenden Stufen um insgesamt 100 mm verschoben. In insgesamt 24 Versuchen wurde die Fuge horizontal geöffnet oder vertikal versetzt oder unter 45° verschoben oder mehrmals geöffnet und wieder vollständig geschlossen. Traten im Versuch Undichtigkeiten in der Abdichtung auf, so musste der Versuch vor Erreichen der angestrebten Endverformung von 100 mm abgebrochen werden.

Alle Dichtungsbahnen erwiesen sich im grossen und ganzen bei der Beanspruchung infolge Fugenbewegung als *zuverlässig wasserdicht*. Nachfolgend beschriebene *Leckagen* waren nicht allein auf die Fugenverformung zurückzuführen:

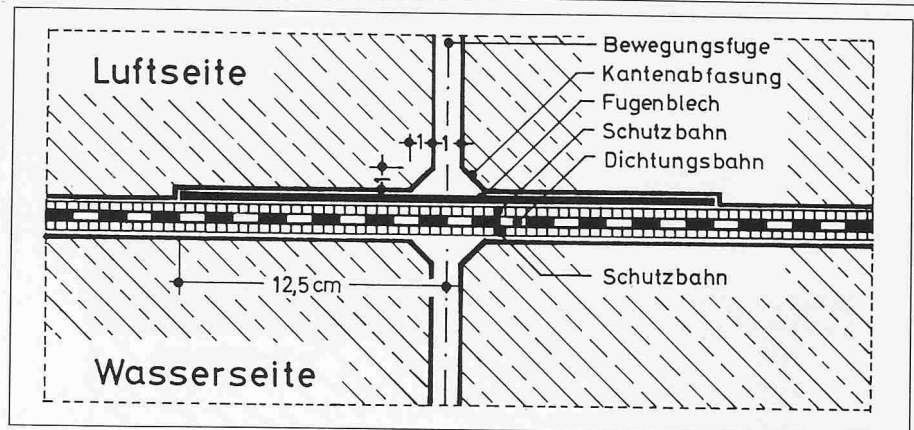


Bild 8. Querschnitt durch die Bewegungsfuge

- Beim Fugenöffnen wurde in einem Versuch das Fugenblech an einer Längsseite durch eine Dübelreihe mit Schrauben an den Winkelbetonplatten verankert. Im Verlauf der Fugenöffnung rissen die Bohrlöcher im Fugenblech aus, bei gleichzeitigem Herausziehen der Dübelschrauben aus der Verankerung. Die Schraubenköpfe durchdrangen dann die Abdichtungshaut mit nachfolgendem Wasseraustritt. Daraufhin wurde das Fugenblech in allen weiteren Versuchen unbefestigt eingelegt.
- In einem zweiten Fall glitt das Fugenblech an einer Längsseite aus der Einbettung zwischen den Betonteilen heraus. Die Hautabdichtung verlor damit ihre Stützung und platzte nach etwa sechs Tagen bei 10 cm Fugenöffnung und 2 bar Wasserdruck auf. Dabei wirkten sich Stossstellen des Fugenblechs mit ihren scharfen Kanten sehr nachteilig aus.
- Bei einer anderen Probe trat die Undichtigkeit nach einer anfänglichen Fugenöffnung von 10 cm und einem nachfolgenden Fugenschliessen auf. Beim Fugenschliessen legen sich allgemein Dichtungsbahnen und Fu-

genblech in Falten (Bild 9). In den Abdichtungskehlen (Übergang Sohle/Wand und Wand/Decke) konzentrieren sich diese Falten und fallen besonders scharfkantig aus. Hier führten Faltenknickung und Verzerrung zur Undichtigkeit.

- In zwei Versuchen wurde die Abdichtung bei einem Fugenversatz von mehr als 70 mm undicht. In beiden Fällen trat der Schaden dort auf, wo die Abdichtung um die versetzte Betonkante der Fuge herumgezogen wird. Die Schutzbahnen zogen sich dort in ihrer Überlappung auseinander, so dass die Dichtungsbahn unmittelbar mit der Betonkante in Berührung kam.

Generell erschien bei Fugenversatz die *Betonkante*, über welche die Abdichtung umgelenkt wird, als die *kritischste Stelle im Fugenbereich*. Die einzelnen Zerrungen der verformten Fugenbleche sind in Bild 10 deutlich zu erkennen. Im Sohlen- und Deckenbereich bildet sich der Fugenversatz scharfkantig aus. Dabei kann die Betonkante, um die das Fugenblech herumgezogen wird, das Blech an mehreren Stellen aufreißen. Im Wandbereich treten dagegen starke

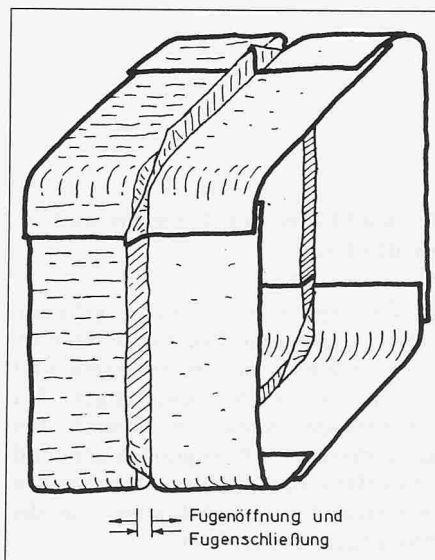


Bild 9. Verformung des Fugenblechs infolge mehrmaligen Fugenöffnens und -schliessens

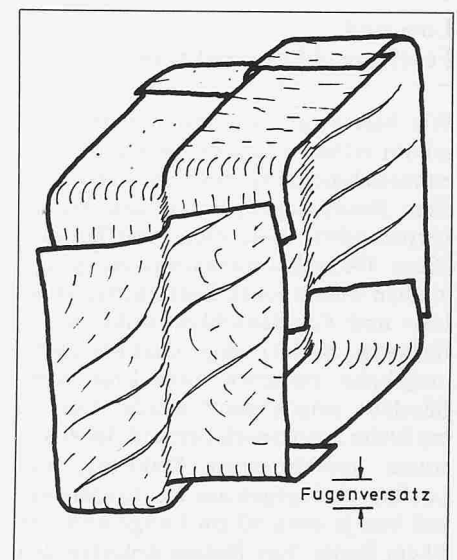


Bild 10. Durch Fugenversatz verformtes Fugenblech

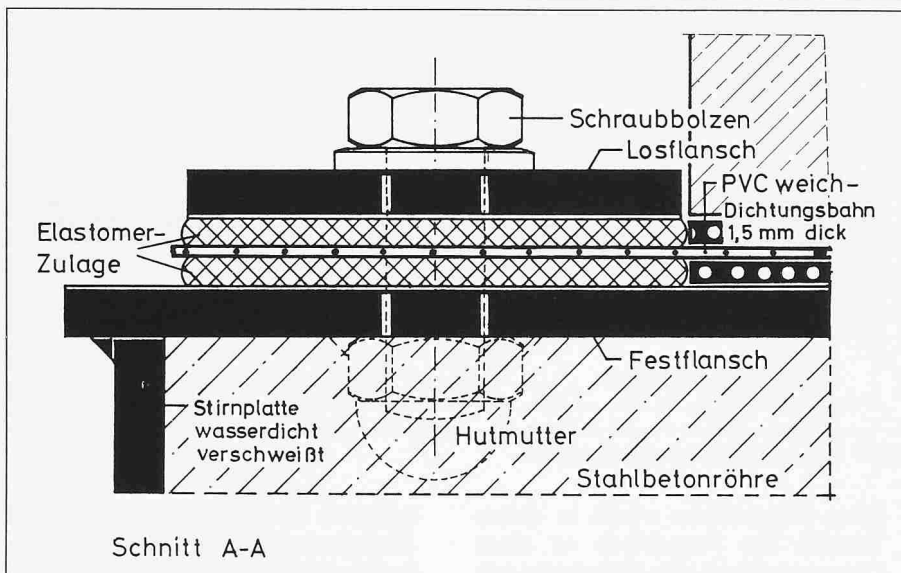


Bild 11. Flanschkonstruktion des Probekörpers

Verzerrungen auf. Hier wirken die Kräfte aus den Wandflächen schubartig auf das Fugenblech ein, das sich dadurch unter starker Faltung verformt. Die Faltenbildung tritt nicht nur zwischen den Fugenufern auf, sondern reicht über die volle Breite des Stützblechs weit in die Einbettungszone der Abdichtung hinein. Im Übergang zwischen Sohle und Wand bzw. Wand und Decke bildet sich bei Fugenversatz jeweils eine scharf geprägte Ecke im Fugenblech aus. Diese Ecken wurden im Versuch besonders stark beansprucht. In vielen Fällen wies das Blech nach dem Versuch besonders auch an diesen Stellen Löcher auf.

Völlig unproblematisch hingegen für die Abdichtung erwies sich die Fugenverformung unter einem Winkel von 45°. Alle derart geprüften Abdichtungen überbrückten die 10 cm Fugenverformung schadensfrei.

Los- und Festflanschkonstruktion

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert, wurde die Kunststoffbahnenabdichtung bei den Versuchen über Bewegungsfugen an den Probekörperenden wasserdicht einflanscht. Diese Flanschkonstruktion entspricht in allen wesentlichen Einzelheiten einer Los- und Festflanschkonstruktion am Bauwerk. Bild 11 zeigt, dass die Dichtungsbahn zwischen zwei Elastomer-Bändern eingeklemmt wurde. Der 13 cm breite Festflansch bestand dabei aus einem geschlossenen Stahlring, der Losflansch dagegen aus vier Einzelstücken von je etwa 50 cm Länge und von 10 cm Breite. Vier Bolzen drückten den Losflansch gegen die Dichtungsbahn. Um eine Liniendichtung sicher zu errei-

chen, muss allgemein an jeder Stelle zwischen den Flanschen zumindest die einwirkende Wasserkraft überdrückt werden. Zu diesem Zweck wurden alle Stossstellen des Losflansches mit 1 mm dicken Blechstreifen überbrückt. Ausserdem begünstigen Unebenheiten und Fertigungsungenauigkeiten in den Stahlflächen sowie Nahtstellen der Abdichtung (*Materialdopplung bei Überlappnähten*) eine Wasserdurchlässigkeit. Um hier Abhilfe zu schaffen, wurden derartige Stellen durch zwei umlaufende, beiderseits der Dichtungsbahn angeordnete Elastomerbänder ausgeglichen. Diese Bänder müssen je nach Ausmass der Unregelmässigkeit genügend anpassungsfähig sein. Das erforderliche Verformungsvermögen wird durch einen entsprechend angepassten niedrigen Elastizitätsmodul und eine Mindestausgangsdicke der Bänder erreicht. Im Versuch kamen 5 mm dicke Elastomerbänder mit einer Shore-A-Härte nach DIN 53 505 von ca. 50 zur Anwendung. Unter den genannten Umständen war ein Anziehmoment der Bolzen von mind. 100 Nm erforderlich, um die Abdichtung wasserdicht einzuflanschen.

Rückschlüsse und Empfehlungen für die Praxis

Die umfangreichen Versuchsergebnisse haben zu wichtigen Erkenntnissen über das Verhalten von lose verlegten und glatten PVCweich-Abdichtungen bei Gleitbeanspruchung, im Bereich von Bauwerksrissen, Bewegungsfugen und Linienflanschen geführt. Sie werden nachstehend zu Empfehlungen für die Praxis zusammengefasst.

Streng genommen haben diese Empfehlungen nur Gültigkeit für Abdichtungs-

aufbauten mit *ungerippten, unkaschierten*, etwa 1,5 mm dicken PVCweich-Dichtungsbahnen mit *beidseitig angeordneter Schutzbahn*. Qualitativ lassen sie aber auch für andere Abdichtungsaufbauten mit PVCweich-Dichtungsbahnen wertvolle Rückschlüsse zu. Einige Empfehlungen enthalten Materialkennwerte und Ansätze für rechnerische Nachweise. Für die Statik des Bauwerks sind diese Hinweiszahlen weitgehend bedeutungslos. Die Hautabdichtung ist nach wie vor *kein tragendes Element* der Gebäudekonstruktion und darf langfristig durch planerische Kräfte nur *senkrecht* zur Abdichtungsfläche belastet werden. Jedoch wird eine Hautabdichtung auch unvermeidbar durch andere Kraftkomponenten beansprucht. Handelt es sich dabei um Gleit- bzw. Schubbeanspruchungen, so wird ein Nachweis der Standsicherheit empfohlen. Alle dafür erforderlichen Werte sind den nachfolgenden Hinweisen zu entnehmen.

Empfehlung 1:

Zur Wahl eines Abdichtungsaufbaus mit guten Hafteigenschaften

Eine Hautabdichtung wird unvermeidbar zumindest an einigen Bauwerksstellen *schubbeansprucht*. Im Regelfall sind dadurch auftretende grössere Gleitverformungen unerwünscht, so dass die Schubkräfte von der Abdichtung oder, sofern dies nicht möglich ist, durch geeignete konstruktive Massnahmen aufgenommen und übertragen werden müssen. Von den untersuchten PVCweich-Abdichtungen erwiesen sich als besonders gut haftend die Aufbauten mit Schutzbahnen aus weichgemachtem Polyvinylchlorid. Wenn mit Schubkräften in der Abdichtungsebene zu rechnen ist, wird in jedem Fall ein Gleitsicherheitsnachweis empfohlen (siehe Empfehlung 4). Bei Normalspannung von $\sigma_E = 0,1$ bis $0,5 \text{ MN/m}^2$ nimmt der Haftreibungskoeffizient den Wert $\mu_0 = 0,30$ bis $0,40$ an.

Empfehlung 2:

Zur Wahl eines Abdichtungsaufbaus mit guten Gleiteigenschaften

An einigen Bauwerkstellen kann eine geringe Haftung erwünscht sein. Diese Situation ist beispielsweise unter einem losen Auflager gegeben. In einem solchen Fall sind Schutzbahnen aus Polyäthylen zu empfehlen. Sie zeigen in den Versuchen die besten Gleiteigenschaften. Der Haftreibungskoeffizient lag bei Normalspannungen von $\sigma_E = 0,1$ bis $0,5 \text{ MN/m}^2$ bei $\mu_0 = 0,13$ bis $0,14$.

Empfehlung 3:

Für Planung und Entwurf von Abdichtung und Bauwerkskonstruktion empfohlene Reibungsbeiwerte

In Abhängigkeit von der Einpressspannung σ_E lassen sich auf Grund der Ver-

suche für fünf verschieden aufgebaute PVCweich-Abdichtungen Haft- und Gleitreibungsbeiwerte angeben. Im einzelnen handelt es sich um lose verlegte PVCweich-Dichtungsbahnen mit beidseitig angeordneten Schutzbahnen aus PVCweich, Kunststoffvlies oder Polyäthylen. Das gesamte dreischichtige Abdichtungspaket ist zwischen zwei zementgebundenen Schalen eingebettet. Die für eine Berechnung empfohlenen Reibungsbeiwerte sind je nach Einpressung und Abdichtungsaufbau Tabelle 2 zu entnehmen.

Empfehlung 4:

Zur Berechnung von Reibungskräften

Wird eine lose verlegte PVCweich-Abdichtung schubbeansprucht, so lassen sich die Reibungskräfte mit Hilfe des Reibungsgesetzes ermitteln. Um Unebenheiten in den angrenzenden Betonflächen und andere Störeinflüsse abzudecken, sollte in die Berechnung ein Sicherheitsfaktor von $v = 2$ einbezogen werden. Dieser Faktor wird je nach Fragestellung als Multiplikator oder als Divisor in die Berechnungsgleichung eingesetzt. Sollen Gleitverschiebungen von Bauteilen auf der Abdichtung ausgeschlossen werden, so ist der nach dem Reibungsgesetz ermittelte Wert für die Reibungskraft R durch v zu dividieren (vergl. Empfehlung 1):

$$R_{0zul} = \mu_0 \cdot N \cdot \frac{1}{v} \text{ bzw. } R_{1zul} \\ = \mu_1 \cdot N \cdot \frac{1}{v}$$

Die zugehörige Schubspannung beträgt analog:

$$\tau_{0zul} = \mu_0 \cdot \sigma_E \cdot \frac{1}{v} \text{ bzw. } \tau_{1zul} \\ = \mu_1 \cdot \sigma_E \cdot \frac{1}{v}$$

Sollen dagegen die über die Abdichtungsfläche übertragenen Schubkräfte klein gehalten werden, so ist die rechnerisch ermittelte Reibungskraft mit v zu multiplizieren.

$$R_0 = \mu_0 \cdot N \cdot v \text{ bzw. } R_1 = \mu_1 \cdot N \cdot v$$

Die entsprechenden Spannungen lauten:

$$\tau_0 = \mu_0 \cdot \sigma_E \cdot v \text{ bzw. } \tau_1 = \mu_1 \cdot \sigma_E \cdot v$$

Darin sind:

- R_0 = Reibungskraft, parallel zur Abdichtungsfläche, (= maximale Tangentialkraft) im Ruhezustand
- R_1 = Reibungskraft, parallel zur Abdichtungsfläche im Gleitzustand
- N = Normalkraft, bezogen auf die Abdichtungsfläche (= $\sigma_E \cdot F$), Auflast
- μ_0, μ_1 = Reibungskoeffizienten im Ruhe- bzw. Gleitzustand; siehe auch Empfehlung 3

Tabelle 2. Haft- und Gleitreibungsbeiwerte für lose verlegte PVCweich-Abdichtungen mit unterschiedlichen Schutzbahnen

Zeile	Abdichtungsaufbau ¹⁾	Haftreibungsbeiwert μ_0				Gleitreibungsbeiwert μ_1			
		bei Einpressung von σ_E [MN/m ²]				bei Einpressung von σ_E [MN/m ²]			
		0,05	0,1	0,5	2,0	0,05	0,1	0,5	2,0
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	PVCw-SB PVCw-DB PVCw-SB	0,78	0,40	0,33	0,22	0,65	0,36	0,26	0,20
2	PVCw-SB PVCw-DB Vlies	0,40	0,28	0,25	0,17	0,31	0,21	0,18	0,12
3	Vlies PVCw-DB Vlies	0,26	0,18	0,17	0,16	0,21	0,17	0,14	0,12
4	PE-SB PVCw-DB Vlies	0,25	0,23	0,19	0,13	0,22	0,18	0,14	0,10
5	PE-SB PVCw-DB PE-SB	0,21	0,14	0,13	0,12	0,17	0,12	0,10	0,10

- v = Sicherheitsbeiwert
- $\tau_{0/1}$ = Reibungsspannung im Ruhe- bzw. Gleitzustand
- σ_E = Einpressung

Empfehlung 5:

Zur Wahl der Schutzbahnen bei hohen Flächenpressungen

Eine gleichmässige Flächenbelastung ist im allgemeinen für eine lose verlegte Kunststoffabdichtung generell unproblematisch. Mit grösseren Fliesserscheinungen ist auch bei Ausfliessmöglichkeiten am Bauwerksrand weder bei den Dichtungsbahnen noch bei den Schutzbahnen zu rechnen. Die einzelnen Schutzbahnen lassen sich jedoch je nach Ausgangsmaterial unterschiedlich stark zusammendrücken. Insbesondere werden Schutzvliese wegen ihres grossen Hohlraumgehaltes bei Flächenbelastung in hohem Masse gestaucht. Bei ihrer Anwendung ist daher generell zu beachten, dass für die Schutzfunktion nur die Dicke der Vliese unter Auflast, also im gestauchten Zustand, gewertet werden kann. Bei zu geringer Vliesdicke können infolge der Stauchverformungen Unebenheiten (z.B. Körner und Betongröße) in die Dichtungsbahn eindringen und hier letztlich zu Perforationen führen. Bei hoher Flächenbelastung wird deshalb die Verwendung weitgehend hohlraumfreier Schutzbahnen z.B. aus PVCweich oder PE empfohlen, deren Zusammendrückung maximal wenige zehntel Millimeter beträgt.

Empfehlung 6:

Zum mechanischen Schutz von PVCweich-Dichtungsbahnen über langsam sich öffnenden Bauwerkrissen

Generell zeigten alle untersuchten Dichtungsbahnen etwa gleich gute mechanische Eigenschaften bei der Beanspruchung durch langsames Öffnen eines Bauwerkrisses. Dem im Rissbereich auftretenden Gleit- und Dehnprozess setzten die Abdichtungsmaterialien ausreichende Gleit- und Dehneigen-

schaften entgegen. Dadurch werden Spannungen und Dehnungen im Bahnenmaterial relativ klein gehalten, ohne auch nur annähernd die Bruchgrenzen zu erreichen. Ein eventuell einseitig wirkender Wasserdruck, der versuchstechnisch nicht berücksichtigt wurde, dürfte die Hautabdichtung über dem geöffneten Riss zusätzlich auf Dehnung beanspruchen. Zur Stützung der Dichtungsbahn erscheinen härter eingestellte PVCweich- oder PE-Schutzbahnen gut geeignet. Dabei sollte in jedem Fall die Rissöffnung auf 5 mm begrenzt bleiben. Kunststoffvliese sind dagegen für die Verwendung an besonders rissgefährdeten Bauteilen weniger gut zur Stützung der Dichtungsbahn geeignet. Einmal geben sie dem Druck des Grundwassers nach und zum anderen kann bei grösserer Rissöffnung der Vliesverbund leicht verlorengehen und ein Zerreißen der Vliese einsetzen.

Empfehlung 7:

Zur Wahl einer Dichtungsbahn über Bauwerksfugen

Auf Grund der Untersuchung mit einer repräsentativen Auswahl von PVCweich-Bahnen für Abdichtungen erscheinen für den Bereich von Bewegungsfugen PVCweich-Bahnen nach DIN 16 937/DIN 16 938 in mechanischer Hinsicht als Hautabdichtung geeignet. Die Fugenverformung soll bei Stützung durch ein Fugenblech und einmaliger Verformung ein Endmass von 50 mm nicht überschreiten. In diesem Fall kann die Verformungsrichtung horizontal, vertikal oder auch geneigt sein. Rückverformungen oder sogar ein mehrmaliges Fugenöffnen und -schliessen sollen im Höchstmass (Amplitude) kleiner als 10 bis 15 mm gehalten werden. Beim Fugenöffnen zieht sich die Dichtungsbahn aus den Einbettungsbereichen neben der Fuge heraus. Findet danach ein Fugenschliessen statt, so schiebt sich die Bahn nicht wieder zurück in den Einbettungsbereich, sondern sie legt sich zwischen den Fugenflächen in Falten. Je mehr sich die

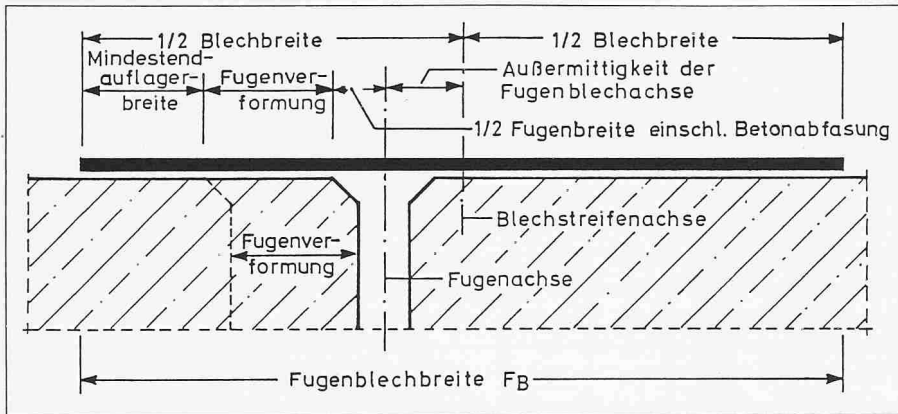


Bild 12. Schema zur Bemessung einer ausreichenden Fugenblechbreite

Fuge schliesst, desto schärfer wird die Dichtungsbahn geknickt und um so mehr die Dichtfunktion gefährdet. Bei einer einmaligen Fugenverformung von maximal 50 mm bleiben die mittleren Dehnungen und Spannungen weit unter den normenmässig geforderten Grenzwerten.

Empfehlung 8:

Zur Wahl der Schutzschichten im Bereich einer Bewegungsfuge

Im Fugenbereich wird eine Abdichtungshaut unter anderem durch die Betonkanten der Bauwerksfuge und durch scharfe Kanten des Fugenblechs gefährdet. Beiderseits der Dichtungsbahn angeordnete Schutzschichten sollen Perforationen oder andere mechanische Beschädigungen an den genannten Stellen vermeiden. Im Hinblick auf diese Aufgabenstellung werden Schutzbahnen aus weichgemachtem PVC oder aus Polyäthylen empfohlen. Die Stossstellen müssen ausreichend überlappt werden, so dass sie bei Fugenbewegung nicht auseinandergezogen werden. So kann im allgemeinen eine Überlappung von 10 cm im Fugenbereich als ausreichend gelten. Schutzvliese wie z. B. aus Polyesterfasern demgegenüber schon bei geringen Fugenverformungen auseinander. Bei ihnen konzentriert sich die auftretende Dehnung infolge Fugenverformung nahezu ausschliesslich auf den frei tragenden Bereich zwischen den Fugenufern, während Kunststoffbahnen die seitlich angrenzenden eingebetteten Zonen am Dehnprozess beteiligen. Bei Verwendung von Vliesen als Schutzschichten wird im Fugenbereich eine jeweils zum Beton hin angeordnete Zulage aus Kunststoffbahnenmaterial empfohlen.

Empfehlung 9:

Zur Anordnung des Fugenblechs

Über einer Bauwerksfuge müssen bei einseitig wirkendem Wasserdruck zur Stützung der Kunststoffbahnenabdichtung geeignete Stützelemente angeordnet werden. Allgemein werden zurzeit in der Praxis etwa 0,7–0,8 mm dicke

Bleche verwendet. Auf Grund der Versuche mit 0,5 mm und 0,22 mm dicken Blechen kann eine Blechdicke von 0,7 bis 0,8 mm bei Wasserdrücken bis zu 2 bar als völlig ausreichend angesehen werden. Die Breite des Fugenblechs muss so gross gewählt werden, dass sie auch die maximal geöffnete Fuge sicher überdeckt und die Dichtungsbahn ausreichend stützt. Sie errechnet sich aus:

$F_B = 2 \times \text{Mindestauflagerbreite bei maximal geöffneter Fuge} + 2 \times \text{zu erwartendes Verformungsmass} + 2 \times \text{handwerklich bedingter Aussermittigkeit der Fugenblechachse} + \text{Ausgangsfugenbreite einschliesslich eventueller Abfasungen}$ (s. Bild 12). Danach ergibt sich beispielsweise bei einer zu erwartenden Fugenverformung von 50 mm, einer Lageungenauigkeit des Fugenblechs von 30 mm, einer Ausgangsfugenbreite von 20 mm mit 10 mm Kantenfasung und einer Mindestauflagerbreite von 50 mm eine Gesamtbreite des Fugenblechs von 300 mm.

Das Stützblech über einer Bewegungsfuge sollte mindestens 250 mm breit sein und lose, d. h. an seinen Rändern nicht fixiert eingebaut werden. Eine Andübelung des Fugenblechs an den Konstruktionsbeton führte in den Versuchen schon bei geringer Fugenbewegung zum Ausreißen der Dübel und damit zu Verletzungen der Abdichtungshaut bzw. zu Undichtigkeiten. Wie in Empfehlung 5 in Verbindung mit der Dichtungsbahn angesprochen, so soll auch das Fugenblech möglichst nicht gestaut werden. Die sich dadurch bildende Faltung führt leicht zu scharfen Knicken und Bruchstellen im Blech. Werden horizontale reversible Fugenbewegungen erwartet, so sollen zur Stützung der Abdichtung keine Fugenbleche gewählt, sondern andere Massnahmen wie z. B. der Einbau eines Ausseifenbands getroffen werden.

Empfehlung 10:

Zur Los- und Festflanschkonstruktion

Im Zuge eines Tunnelbauwerkes werden unter Umständen linienhafte Ein-

flansungen der Abdichtung erforderlich. Zur Erzielung einer wasserdichten Konstruktion soll die Dichtungsbahn zwischen zwei elastischen Zulagen angeordnet und zwischen Los- und Festflansch eingeklemmt werden. Die Schutzbahnen müssen ausserhalb der Flansche enden. Als Zulagen werden ca. 5 mm dicke Elastomerbänder mit einer Shore-A-Härte nach DIN 53 505 von etwa 50 bis 60 empfohlen. Die Bandbreite sollte der Flanschbreite entsprechen. Als Losflansch wird ein Flachstahl 100 mm $\times$ 10 mm mit einem Bolzenabstand von ≤ 150 mm empfohlen. Grössere Losflansch-Zwischenräume von 3 mm und mehr müssen mit kleinen Blechstreifen überbrückt werden.

Als mittlerer Anpressdruck des Losflansches werden mindestens 2,0 MN/m² empfohlen. Das entspricht bei Bolzen M20, einem Abstand von 125 mm und einer Flanschbreite von 100 mm etwa einem Anziehmoment von 100 Nm. Versuche mit einem wirksamen Wasserdruck von 2 bar liessen bei diesen Verhältnissen keinerlei Undichtigkeiten im Flanschbereich erkennen. Bei höheren Wasserdrücken muss die Einklemmspannung entsprechend angehoben werden, bei niedrigeren Wasserdrücken sollte sie aus Sicherheitsgründen bei 2 MN/m² belassen werden.

Schlussbemerkung

Die vorstehend erläuterten Untersuchungen haben einen Beitrag zur Kenntnis über das mechanische Verhalten von lose verlegten PVCweich-Abdichtungen geleistet. Die Versuche liessen anschaulich das Kräftespiel und den Verformungsablauf in der Abdichtung erkennen. Weitere Einzelheiten zu den Versuchen und deren Auswertung sind dem Band 24 der STUVA-Buchreihe «Forschung + Praxis, U-Verkehr und unterirdisches Bauen» zu entnehmen. Dieses Buch ist unter dem Titel «Mechanisches Verhalten von PVCweich-Abdichtungen» im Alba-Buchverlag, Düsseldorf erschienen. Insgesamt haben die Versuche zu einer zweckmässigen und zuverlässigen Bemessung geführt. Auf diese Weise dürfte sich angesichts immer komplizierter werdender Bauverfahren sowie steigender Lohn- und Materialkosten eine wirtschaftlich und technisch optimale Abdichtungstechnik mit Kunststoffbahnen erzielen lassen.

Adresse der Verfasser: Dr. F. Poyda, dipl. Ing., c/o Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen E.V. (Stuva), Mathias-Brüggengraben 41, D-5000 Köln 30