

Abdichtung begeh- und befahrbarer Auffangräume

T 2391

T 2391

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Bericht

zum Forschungsvorhaben

ABDICHTUNG BEGEH- UND BEFAHRBARER AUFFANGRÄUME

-Schlußbericht-

von

Dipl.-Ing. Rolf Jäger

Dr.-Ing. Bernhard Kipp

Datum des Berichtes: 13.12.1991

Auftrag: 31/98 029/10 312

Gefördert vom

Institut für Bautechnik in Berlin (IfBt) mit Mitteln der
Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Az. IV 1-5-566/89

Vorwort

Bereits im Jahre 1985 ist über das Innenministerium Nordrhein-Westfalen ein Forschungsantrag zum Thema "Abdichtung begeh- und befahrbarer Auffangräume" gestellt worden, der ursprünglich zwei Teile umfaßte:

- Erfahrungen mit bestehenden Anlagen und Erfassung der zum Einsatz kommenden Flurförderzeuge
- Befahrbarkeitsversuche an vom IfBt -ohne Berücksichtigung einer Begeh- oder Befahrbarkeit- zugelassenen Systemen.

Nach drei Jahren ohne Reaktion wurden wir im Herbst 1988 aufgefordert, den ehemals 2. Teil beim IfBt neu zu beantragen. Durch den Wegfall des 1. Teiles entfiel auch ein entsprechender zeitlicher Vorlauf zur Vorbereitung des überwiegend experimentellen, 2. Teils.

Die für den experimentellen Teil erforderliche Verschleißmaschine ist in der FMPA Baden-Württemberg zur Prüfung von Estrichen entwickelt worden; sie steht schon aus diesem Grund nicht beliebig zur freien Verfügung. Mehrfache Verschiebungen zu Beginn der Verschleißversuche waren ebenso wenig zu vermeiden, wie Verzögerungen während der Versuche, die durch Defekte an der Versuchseinrichtung und durch Modifikationen der Versuchskörper entstanden.

Die Untersuchungen wurden auf Antrag von Herrn Dipl.-Ing. Rolf Jäger, Leiter des Referates 31 (Anstriche, Beschichtungen, Bautenschutz) der "FMPA Baden-Württemberg" vom "Institut für Bautechnik" in Berlin (IfBt) mit Mitteln der "Länderarbeitsgemeinschaft Wasser" (LAWA) gefördert.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. <u>Einleitung</u>	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Auftrag; Zielsetzung	2
2. <u>Systemspezifische Randbedingungen</u>	3
2.1 Untersuchte Systeme; Codierung	3
2.2 Systemaufbauten, Stoffe	4
2.3 Besonderheiten im Aufbau	7
3. <u>Beurteilungskriterien, Prüfungen</u>	8
3.1 Derzeit gültige Kriterien und Prüfungen nach den BPG	8
3.2 Kritische Betrachtungen zu derzeitigen Prüfverfahren	8
3.3 Änderungsvorschläge	12
3.4 Zusätzliche Beanspruchungen durch Begehen und Befahren von Beschichtungen	15
3.5 Sicherheitsbetrachtungen	20
4. <u>Untersuchungsergebnisse</u>	23
4.1 Rißüberbrückung an modifizierten BPG-Platten	23
4.2 Haftzugfestigkeiten im Rißbereich	25
4.3 Befahrbarkeitsversuche	26
4.4 Kugelfallversuch	29
4.5 Rutschfestigkeit	30
5. <u>Zusammenfassung und Schlußfolgerung</u>	32
Literaturhinweise	34
- Anhang 1	
- Anhang 2	
- Anhang 3	

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Als vor etwa 25 Jahren die "Bau- und Prüfgrundsätze für Beschichtungen für Beton-, Putz- und Estrichflächen von Auffangwannen und Auffangräumen für wassergefährdende Flüssigkeiten" (BPG) aufgestellt wurden, ging es fast ausschließlich um Anstriche auf Dispersionsbasis für Auffangwannen für Heizöl EL in privaten Haushalten. Ihrer Bestimmung entsprechend war ein Begehen oder gar ein Befahren dieser Anstriche auf mineralischen Untergründen nicht vorgesehen.

Später wurden in den BPG weitere Prüf Flüssigkeiten angegeben, mit denen nach einer erfolgreichen Prüfung und Aufnahme in den entsprechenden Prüfbescheid ganze Gruppen von wassergefährdenden Flüssigkeiten abgedeckt werden konnten. Nach Heizöl EL und Dieselkraftstoff handelte es sich dabei um weitere Kohlenwasserstoffe, organische Lösemittel, die wichtigsten (anorganischen) Säuren und Laugen sowie Salzlösungen. Die Einbeziehung von z. T. leicht entzündlichen Flüssigkeiten machte eine anti-statische Ausrüstung der entsprechenden Beschichtungen erforderlich. Neben Auffangräumen innerhalb geschlossener Gebäude wurden solche im Freien mit erfaßt, wodurch die Witterungsbeständigkeit von Beschichtungen in den Anforderungskatalog mit aufgenommen wurde.

Nach wie vor unberücksichtigt blieben jedoch die Begeh- und Befahrbarkeit von Gewässerschutzbeschichtungen, weshalb ihre Anwendungsbereiche, bzw. die vom IfBt erteilten Zulassungen -streng genommen- auf reine Lagerräume mit ortsfesten Behältern bzw. Tanks beschränkt blieben, deren Inhalt von außen über Rohrleitungen umgeschlagen wurde.

Von den bisher im Gewässerschutz definierten Bereichen mit entsprechendem Gefahrenpotential, den LAU-(Lagern, Abfüllen, Umschlagen) bzw. den HBV-(Herstellen, Behandeln, Verwenden)

Anlagen, war demnach lediglich das "L" (Lagern) abgedeckt, ein Punkt, auf den hinzuweisen sich das IfBt in jüngerer Zeit zunehmend gezwungen sah.

1.2 Auftrag; Zielsetzung

Aus naheliegenden Gründen des Umweltschutzes im allgemeinen und des Gewässer- (Grundwasser-) Schutzes im besonderen, häufen sich die von Wasserwirtschafts- und Gewerbeaufsichtsämtern erteilten Auflagen zur Sicherung der o. g. Bereiche, die in der weitaus überwiegenden Mehrzahl begangen und/oder befahren werden müssen. Mangels entsprechender Alternativen wurde und wird dabei im günstigsten Fall auf vom IfBt zugelassene Beschichtungssysteme zurückgegriffen, die allerdings bislang nicht unter dem Aspekt der Begeh- und Befahrbarkeit geprüft worden sind. In vielen weniger günstigen Fällen werden von den Länderverwaltungen Zulassungen im Einzelfall erteilt, die sich ausnahmslos auf Gutachten und Eignungsprüfungen ohne einheitliche Beurteilungskriterien stützen.

Aus dieser zweifellos unbefriedigenden Gesamtsituation heraus ergab sich zwangsläufig ein Handlungsbedarf dahingehend, die BPG um brauchbare Kriterien und entsprechende Prüfverfahren zur Beurteilung der Begeh- und der Befahrbarkeit von Beschichtungssystemen zu erweitern.

Um brauchbare, d. h. ausreichend praxisnahe Kriterien aufstellen zu können, müssen die Begriffe "Begeh-" und "Befahrbarkeit" im weitesten Sinne verstanden werden: Im Sinne einer "Verkehrstauglichkeit", die neben den "planmäßigen" Beanspruchungen durch Schuhwerk, Räder und Reifen auch "unplanmäßige" Beanspruchungen durch unvermeidbare "Dreckeffekte" im wahrsten Sinne des Wortes (Schmutz, Fremdkörper, Nässe etc.) ebenso umfaßt, wie Aspekte der Gebrauchs-, bzw. der Verkehrssicherheit.

2. Systemspezifische Randbedingungen

2.1 Untersuchte Systeme; Codierung

Für die im Rahmen dieses Forschungsauftrages durchzuführenden Untersuchungen sind 8 Beschichtungssysteme von 7 verschiedenen Herstellern nach den folgenden Kriterien ausgewählt worden:

- Es sollten die beständigsten, in der Praxis als Deckschichtmaterial (chemikalienbeständige Schicht) verwendeten Kunstharze vertreten sein.
- Es sollten möglichst viele der konstruktiv verschiedenen Systemaufbauten erfaßt werden.
- Es sollte der Einfluß der verschiedenen Möglichkeiten zur antistatischen Ausrüstung eines Systems (Ableitfähigkeit für stat. Elektrizität) erkennbar werden.

Die einzelnen Systeme werden in diesem Bericht unter den folgenden Kurzbezeichnungen (Codes) weitergeführt:

- System 1 (PH/M-35-3D)
- System 2 (EP/M-45-1L)
- System 3 (EP/M-33-SL)
- System 4 (EP/A-44-1L)
- System 5 (EP/A-56-1L)
- System 6 (VE/M-37-2D)
- System 7 (VE/M-56-3L)
- System 8 (VE/A-56-3L)

Die in Klammern gesetzten Kurzbezeichnungen haben folgende Bedeutung:

(XX/Y-YY-YY):

PH (Phenolharz), EP (Epoxidharz) bzw. VE (Vinylesterharz),
Basismaterial der chemikalienbeständigen (Deck-)Schicht

(yy/X-yy-yy):

M (modifiziert allgemein) bzw. A (ableitfähig)

(yy/Y-ab-yy):

"a" verschiedene (nach Material und/oder Funktion) Schichten, in "b" Lagen (= Arbeitsgängen) appliziert

(yy/Y-yy-cx):

"c" Einlagen (Armierungen, i. d. R. Glasvlies oder -Gewebe) in der Deckschicht (D) bzw. in einer separaten Laminatschicht (L)

- Die Angaben beziehen sich jeweils auf die Standardausführungen für ebene, horizontale Flächen.
- Systeme mit Deckschichten auf Polyurethan-Basis sind wegen ihrer stark eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten (vorerst) ausgeklammert worden; sie sind unter den kostengünstigen Systemen relativ häufig vertreten.
- Das System 3 enthält eine ganz spezielle Einlage, die die Funktionen mehrerer konventioneller Schichten erfüllen soll (-SL).

2.2 Systemaufbauten, Stoffe

2.2.1 Untergrundvorbehandlung

Damit auch eine langfristige Haftung eines Beschichtungssystems auf dem (Beton-) Untergrund erreicht werden kann, wird dieser in aller Regel sandgestrahlt und entstaubt, wobei Haftzugfestigkeitswerte von $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ angestrebt werden.

2.2.2 Schichtenfolge

a) Grundierung

Als erster Schritt wird auf den vorbereiteten, alkalischen Untergrund eine verseifungsbeständige Grundierung aufgebracht, die meist auf Epoxidharz-Basis (Systeme 1 bis 5), seltener auf Polyester-Basis (Systeme 6 bis 8) formuliert ist.

b) (Kratz-) Spachtelung

Im Bedarfsfall, d. h. bei unebenen, rauhen Untergründen, wird die Grundierung ersetzt bzw. ergänzt durch eine (Kratz-) Spachtelung mit einem Material, das im wesentlichen aus feuergetrocknetem Quarzsand und der Grundierung als Bindemittel in einem geeigneten Mischungsverhältnis besteht.

Bei den Systemen 7 und 8 wird eine Spachtelschicht grundsätzlich ausgeführt, in einer mittleren Dicke von etwa 1 mm (Vinylesterharz + mineralische Füllstoffe).

c) Ausgleichs- oder Schwimmschicht

Zur Verbesserung der rißüberbrückenden Eigenschaften eines Systems, wird in aller Regel eine relativ schubweiche Ausgleichs- oder Schwimmschicht angeordnet, wobei sich Schichtdicken von etwa 2 mm (eher mehr) als sinnvoll erwiesen haben. Als Basisstoffe kommen hier meist Polyurethan-Epoxidharz-Kombinationen (Systeme 2 und 4 bis 6), seltener modifizierte Polyurethane (System 1) zur Anwendung.

Die Systeme 7 und 8 weisen keine Ausgleichs- oder Schwimmschicht auf.

d) Laminierungsschicht, Armierung

Zugfeste Schicht aus einem oder mehreren, in Laminierharz eingebetteten Glasgeweben oder -vliesen, die -zusammen mit der Ausgleichs- oder Schwimmschicht- das "Durchschlagen" eines im (Beton-) Untergrund entstandenen Risses in die folgende chemi-

kalienbeständige (Deck-) Schicht verhindern soll.

In der Regel liegt eine eigenständige Laminatschicht vor, die die eigentliche rißüberbrückende Trägerschicht für die chemikalienbeständige (Deck-) Schicht bzw. -Versiegelung darstellt (Systeme 2 bis 5, 7 und 8).

In seltenen Fällen (Systeme 1 und 6) wird die Armierung in Form von Glasgewebe(n) oder -vlies(en) direkt in das beständige Deckschichtharz eingebettet so daß eine funktionelle Unterscheidung von Laminat- und Deckschicht nicht mehr möglich ist.

e) Leitschicht

Bei ableitfähigen Systemen ist auf der Laminatschicht, bzw. direkt unter der Deckschicht, eine Leitschicht angeordnet, die durch die Deckschicht dringende, elektrostatische Ladungen einem Erder zuführen sollen. Die Leitschicht kann aus einem geschlossenen Film aus Leitlack (System 5), oder aus einem mehr oder weniger engen Raster aus selbstklebenden Kupferstreifen bestehen, je nach Leitfähigkeit der Deckschicht (System 8).

f) Deckschicht

Die eigentliche chemikalienbeständige Schicht ist die Deckschicht, die jedoch auch in Form eines Laminats vorliegen kann (siehe Abschn. d).

Eigenständige Deckschichten kommen in stark unterschiedlichen Schichtdicken vor, von ca. 0,4 mm (zweifacher Anstrich, System 2) bis ca. 2 mm (Verlaufmörtel, System 4).

Die gängigsten Deckschicht-Materialien basieren auf Epoxidharzen (Systeme 2 bis 5) bzw. auf Vinylesterharzen (Systeme 6 bis 8). Weit seltener werden Phenolharze (System 1) und Furanharze verwendet, wahrscheinlich wegen der Gefährlichkeit ihrer Kom-

ponenten.

Relativ häufig -vor allem in kostengünstigen Systemen- kommen Polyurethanharze zur Anwendung. Sie sind hier aber wegen ihrer stark eingeschränkten Anwendungsbereiche nicht berücksichtigt.

2.3 Besonderheiten im Aufbau

Die Systeme 7 und 8 weisen keine Ausgleichs- oder Schwimmschicht auf, so daß es im Fall einer Rißüberbrückung zwangsläufig zu einer Ablösung vom Untergrund -zumindest in der unmittelbaren Rißumgebung- kommen muß. Derartige Ablösungen können die Dauerhaftigkeit eines Systems -vor allem unter dem Aspekt der Befahrbarkeit- u. U. nachhaltig beeinflussen.

Die Systeme 4 und 8 enthalten in der Deckschicht als anti-statische Ausrüstung jeweils Kohlenstoff in Form von Ruß, Graphit o. ä. in nennenswerten Mengen, wodurch die Begeh- und Befahrbarkeit eingeschränkt werden könnte (Polierfähigkeit, Glättebildung).

3. Beurteilungskriterien; Prüfungen

3.1 Derzeit gültige Kriterien und Prüfungen nach den BPG

Nach den derzeit gültigen BPG (Fassung Nov. 1991) muß eine Beschichtung den folgenden Kriterien entsprechen, was durch entsprechende Prüfungen nachzuweisen ist:

a) Generell

- Rißüberbrückung
- Undurchlässigkeit
- Beständigkeit (gegen die Lagerflüssigkeit(en))
- Haftung (am Untergrund und zwischen den Schichten)
- Alterungsbeständigkeit
- Brandverhalten

b) Für brennbare Flüssigkeiten der Gefahrenklassen AI, AII und B zusätzlich

- Ableitfähigkeit (für elektrostatische Aufladungen)

c) Für Auffangräume im Freien zusätzlich

- Witterungsbeständigkeit

3.2 Kritische Betrachtungen zu derzeitigen Prüfverfahren

Von den in den BPG beschriebenen Prüfverfahren werden nur diejenigen behandelt, die aus hiesiger Sicht einer Überarbeitung bedürfen, besonders im Hinblick auf weitergehende Anforderungen, die sich aus einer Begeh- und Befahrbarkeit ergeben.

3.2.1 Rißüberbrückung

Der in den BPG im Abschnitt 4.1 beschriebene Versuch zur Rißerzeugung in Betonplatten mit den Abmessungen L x B x H =

300 mm x 200 mm x 40 mm ist offensichtlich zu einer Zeit konzipiert worden, als es ausschließlich um die Prüfung von heizölbeständigen Anstrichen ging. Bei den heute zu prüfenden Beschichtungssystemen, die eine Dicke von mehreren Millimetern (bis etwa 7 mm) erreichen und z. T. aus sehr zug- und schubfesten Materialien bestehen, sind die Verhältnisse völlig anders gelagert:

- Aufgrund des unrealistischen Verhältnisses Beschichtungsquerschnitt : Betonquerschnitt entsteht eine mit Sicherheit nicht erwünschte Wechselwirkung in dem Sinne, daß vor allem relativ dicke und starre Beschichtungssysteme wie eine "außenliegende Bewehrung" der Betonplatte wirken und dadurch die Rißbildung im Beton ganz erheblich beeinflussen. Die Wechselwirkung zwischen BPG-Platten und Beschichtung erzeugt in jedem Einzelfall andere Prüfbedingungen für die Beschichtung in Bezug auf die spontan entstehende Rißweite und die Rißöffnungsgeschwindigkeit.

Eine unbeschichtete Platte zeigt bei etwa 12 KN erste Haarrisse, die sich stetig bis auf 0,2 mm aufweiten lassen; dasselbe gilt auch für Platten mit Anstrichen und nicht armierten, dünnen Beschichtungen. Der Versuch ist hier durchführbar.

Bei sehr dicken und starren Beschichtungssystemen können z. T. auch mit Belastungen von deutlich mehr als 50 KN keine Risse im Beton erzeugt werden, oder sie treten schlagartig beim Bruch der Beschichtung auf, wobei sie dann deutlich größer werden als 0,2 mm. In diesen Fällen ist die Rißweite nicht mehr steuerbar, und der Versuch ist nicht mehr im Sinne der BPG durchführbar: Der vergleichsweise kleine Betonquerschnitt reißt nicht, wann er will, sondern erst dann, wenn die Beschichtung es zuläßt!

Der gesamte Versuchsablauf sowie die Armierung der BPG-Platten deuten darauf hin, daß im Versuch die Beanspruchung ei-

nes Anstriches bzw. einer dünnen Beschichtung durch einen vorhandenen, sich langsam erweiternden Haarriß im Untergrund nachvollzogen werden soll. Aus breit angelegten Versuchsreihen mit bituminösen Abdichtungen nach DIN 18 195, Teil 6, ist uns bekannt, daß der weitaus kritischere Lastfall die spontane Rißentstehung im Untergrund (Beton) ist, weil dabei ganz erheblich höhere (Dehn-) Geschwindigkeiten auftreten, als bei einer nachfolgenden Rißweiten-Änderung!

Speziell bei begeh- und befahrbaren Auffangwannen kann nicht davon ausgegangen werden, daß zum Zeitpunkt des Beschichtens bereits alle Risse im (Beton-) Untergrund vorhanden sind und keine neuen Risse mehr auftreten. Eine Aktualisierung des Rißüberbrückungsversuches unter Berücksichtigung praxisnaher Randbedingungen bei der spontanen Rißentstehung erscheint deshalb unverzichtbar.

- Ein weiterer Punkt im Zusammenhang mit dem Rißüberbrückungsversuch sind die bei dicken und zugfesten Systemen veränderten, geometrischen Randbedingungen: Die beschichtete Fläche bei BPG-Platten weist eine Größe auf von $L \times B = 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ mit "freien Rändern". Diese wirken sich bei dünnen Beschichtungen und Anstrichen nicht nachteilig aus, weil deren Zugfestigkeit weit geringer ist, als die durch Schub übertragbare Verbundkraft (günstiges Verhältnis von Schichtdicke zu Verbundlänge).

Bei dicken, zugfesten Systemen, die oft noch eine gewollt schubweiche "Schwimmschicht" enthalten, wirken sich freie Ränder dahingehend aus, daß sich die Systeme der beabsichtigten (Zug-) Beanspruchung weitestgehend entziehen, weil die freien Ränder nachrücken können (ungünstiges Verhältnis von Schichtdicke bzw. Zugfestigkeit zu Verbundlänge bzw. Schubsteifigkeit).

Bereits vor dem eigentlichen Versuch können sich durch die freien Ränder unbeabsichtigt günstige Randbedingungen ein-

stellen: Die auch hier verwendeten Vinylesterharze z. B. neigen beim Aushärten stark zum Schrumpfen (ca. 3-10%, je nach Verfüllung), was -entgegen der Praxis- mit freien Rändern weitgehend möglich ist. Deshalb entstehen keine nennenswerten Schrumpfspannungen, die -der Praxis entsprechend- der Beanspruchung durch eine Rißentstehung im Untergrund zu überlagern wären!

- Bei dicken und zugfesten Systemen führt die große erforderliche Verbundlänge auch zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Risse, die man im BPG-Versuch möglichst gleichzeitig und in gleicher Größe erzeugen möchte: In aller Regel wird der zuerst aufgetretene Riß auch deutlich (rascher) größer als der andere, weshalb der zweite Riß stets eine zufällige Größe von weniger als 0,2 mm annimmt. Die Beanspruchung der Beschichtung ist in diesem Bereich nicht definierbar, weshalb davon abgeleitete Versuchsergebnisse so gut wie wertlos sind.

3.2.2 Widerstandmessungen bei ableitfähigen Systemen

Nach hiesiger Auffassung können die beiden Kriterien nach den BPG (Abschnitt 3.7.2) nur bei Berücksichtigung des Abschnitts 3.7.3 der BPG für einen ausreichenden Erdableitwiderstand ($\leq 1 \cdot 10^8 \Omega$, entsprechend Abschnitt 8.1.5 der BPG) als hinreichend gelten: Wie die Praxis der zugelassenen Systeme zeigt, ist durchaus nicht bei allen Systemen mit nicht leitfähigen Zwischenschichten eine ausreichend niederohmige Leitschicht vorhanden, die den Erdableitwiderstand praktisch unabhängig von den Abmessungen des Auffangraumes machen würde: Aus den BPG, Abschnitt 3.7 geht weder hervor, wer die in Abschnitt 3.7.3 enthaltene Bedingungen prüft, deren Erfüllung die unabdingbare Voraussetzung für die Gültigkeit der o. g. Kriterien darstellt, noch wie sie geprüft werden soll.

3.3 Änderungsvorschläge

3.3.1 Zur Rißüberbrückung

a) Prüfkörper (BPG-Platte)

Anordnung einer mittigen Kerbe als Soll-Bruchstelle zur Erzeugung eines kontrollierbaren Risses.

b) Beschichtung des Prüfkörpers

Mit Ausnahme der Schwimm- und/oder Ausgleichsschicht(en) wird der gesamte Aufbau um die angefasten, schmälere Kanten auf die Stirnseiten der Platten bis zu deren Unterkante herumgeführt. Die "freien Ränder" sind damit weitgehend beseitigt. Sie können im Versuch nicht mehr "nachrücken"; Schrumpfspannungen bleiben erhalten.

c) Belastungsanordnung.

Im Prinzip kann die Belastungsanordnung entsprechend Bild 2 der BPG beibehalten werden.

Zur Verminderung der für ein bestimmtes Biegemoment erforderlichen Auflagerkräfte könnte der Abstand der unteren Auflager jedoch noch auf ca. 40 mm verringert werden (bisher 2 x 45 mm). Auf diese Weise könnte die Gefahr vermindert werden, daß die Beschichtung entlang der oberen Auflager "einbricht" und so "freie Ränder" entstehen, die einen Versuch unbrauchbar machen.

d) Belastungsgeschwindigkeit.

Im Anhang 1 zu diesem Bericht sind die Vorgänge bei der spontanen Rißentstehung in unbewehrten und bewehrten Betonquerschnitten unter vereinfachenden Annahmen formuliert. Dabei zeigt sich unter anderem, daß die Geschwindigkeit, mit der sich im Beton spontan entstehende Risse öffnen (Rißöffnungsgeschwindigkeit), eine Materialkonstante ist, die auch im Falle

bewehrter Querschnitte kaum von der Bewehrung beeinflusst wird, zumindest nicht im Bereich üblicher Bewehrungsgrade (vergleiche hierzu Gleichung (16) und Gleichung (56)).

Unter vorsichtiger Annahme von Bruchspannung ($\sim 3 \text{ N/mm}^2$) und Bruchdehnung ($\sim 1 \cdot 10^{-4} = 0,1 \text{ ‰}$) für Beton ergibt sich eine (mittlere) Rißöffnungsgeschwindigkeit von etwa 400 mm/s und damit eine Größenordnung von 10^2 mm/s .

Bisher wird nach den BPG ein Riß von $0,2 \text{ mm}$ innerhalb von mindestens 10 min erzeugt, was einer mittleren Rißöffnungsgeschwindigkeit von etwa $3 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}$ entspricht; eine Größenordnung von 10^{-3} mm/s . (Eine bessere Genauigkeit läßt die oben aufgezeigte Betrachtungsweise nicht zu!)

Trotzdem wird deutlich, daß selbst bei vorsichtiger Abschätzung zwischen Versuch und Praxis etwa 4-5 Zehnerpotenzen liegen!

Wegen der vom jeweiligen System abhängenden, stark unterschiedlichen Reaktionskräfte, ist eine wegabhängige Steuerung der Rißüberbrückungsversuche unverzichtbar. Die hierzu notwendigen Prüfmaschinen mit mechanischem (Spindel-) Antrieb lassen in der Regel eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit über 3 Zehnerpotenzen zu. Die bisherige Prüfung erfordert mit der Lasteintragungsvorrichtung der FMPA BW eine Vorschubgeschwindigkeit von etwa $0,3 \text{ mm/min}$. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit beträgt etwa 300 mm/min , so daß eine Steigerung um 3 Zehnerpotenzen möglich wäre. Rißöffnungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 1 mm/s sind damit ohne weiteres realisierbar. Die Versuchsdauer von etwa $0,2 \text{ s}$ macht eine direkte Wegsteuerung jedoch unmöglich, so daß folgendermaßen zu verfahren wäre:

Der 1. Versuch wird mit der bisherigen Geschwindigkeit gefahren, bis der Riß im Beton 0,2 mm weit ist. Der Weg, den die Maschine dabei zurückgelegt hat, wird festgehalten und bei den folgenden Versuchen mit 5 mm/s durchfahren, falls die Beschichtung nicht schon beim 1. Versuch gerissen ist.

Die vorgeschlagenen Modifikationen können unter Beibehaltung der Probekörperabmessungen und der Prüfeinrichtung leicht vorgenommen werden; sie wurden anhand einer Versuchsreihe (a bis c) bzw. in Tastversuchen (d) erprobt und führten zu anderen Ergebnissen, als der derzeit übliche Versuch (siehe Abschnitt 4.1). Nach hiesiger Meinung sind die Rißüberbrückungsversuche auf diese Weise nicht nur rascher und preiswerter durchführbar; durch eine deutlich verbesserte Praxisnähe sind sie auch aussagekräftiger.

3.3.1 Zur Widerstandsmessung

Damit beide Komponenten des Erdableitwiderstandes erfaßt werden können (Durchgangswiderstand R_D und Widerstand des Leiters zur Erde R_L), werden in den Beschichtungsaufbau der BPG-Platten, und zwar an den Stirnseiten (siehe Punkt b) des vorangehenden Abschnitts), Kupferbänder unter die ableitfähigen Schichten eingebaut, die entlang den Platten-Unterkanten verlaufen und seitlich als "Fahnen" herausgeführt werden. Der Abstand der beiden "Erder" ergibt sich so zu etwa $\frac{1}{3}$ Meter. An einer derart präparierten BPG-Platte läßt sich folgendes messen:

a) Durchgangswiderstand R_D

Unter Verwendung einer Aufsatzelektrode (wie bisher), die auf eine Stirnseite der BPG-Platte aufgesetzt wird, kann gegen die aus dieser Stirnseite herausgeführt Kupferfahne der Durchgangswiderstand R_D gemessen werden (Anforderung: $R_D < 10^8 \Omega$).

b) Widerstand des Leiters zur Erde R_L

Der Widerstand zwischen den Fahnen auf den sich gegenüberliegenden Stirnseiten der BPG-Platte entspricht grob dem entfernungsabhängigen Widerstand R'_L des Leiters zur Erde und sollte -entsprechend dem Abstand der Fahnen von etwa $\frac{1}{3}$ Meter - mit 3 multipliziert in Ω/m angegeben werden.

Damit der Erdableitwiderstand ($< 10^8 \Omega$) in der Praxis nicht nennenswert vom Leiter zur Erde beeinflußt wird, sollte dieser höchstens etwa 1 % von R_D erreichen. (Empfehlung: $R_L \leq 10^6 \Omega/m$; für $10^7 \Omega < R_D < 10^8 \Omega$ jedoch: $R_L \leq 10^5 \Omega/m$).

c) Ableitwiderstand R_{D+L}

Der Widerstand zwischen der Aufsatzelektrode auf der einen Stirnseite und der Kupferfahne auf der anderen Stirnseite gibt einen Hinweis auf die Ableitfähigkeit des Systems: Im Normalfall muß $R_{D+L} = R_D + R'_L$ (R'_L ist in diesem Fall der reine Meßwert in Ω). Für $R_{D+L} > R_D + R'_L$ ist die Ursache für die erhöhten (Übergangs-) Widerstände auszuschalten.

Bei der hier beschriebenen Versuchsanordnung kann auf die Herstellung gesonderter Prüfkörper verzichtet werden (beschichtete Stahltafeln), bei denen die Messungen oft durch eine unvermeidbare Kondensatorwirkung erschwert werden (steigende oder fallende Meßwerte, je nach Polung).

3.4 Zusätzliche Beanspruchungen durch Begehen und Befahren von Beschichtungen

Da das Befahren (mit Flurförderzeugen) gegenüber einem Begehen in jedem Fall die höheren spezifischen Beanspruchungen mit sich bringt, kann davon ausgegangen werden, daß eine "Begehbarkeit" durch eine "Befahrbarkeit" mit abgedeckt ist. Eine Differenzierung in "begehbar", aber "nicht befahrbar" erweist sich als nicht sinnvoll, weil auch eine planmäßige "Begehbar-

keit" eine allgemeine "Verkehrstauglichkeit" in dem Sinne voraussetzt, wie sie unter Kapitel 1.2 (Auftrag, Zielsetzung), letzter Abschnitt, definiert wurde.

Eine Ausnahme hiervon bilden nach unserer Kenntnis lediglich Hochregallager mit vollautomatischem, computergesteuertem Umschlag und entsprechenden Übergabestationen. Derartige Anlagen sind nicht an die übrigen Verkehrswege angeschlossen und werden in aller Regel auch nicht begangen: Alles, was bei einer "Verkehrstauglichkeit" über die "reine Befahrbarkeit" (Beanspruchung durch das rollende, gelenkte und gebremste Rad) hinausgeht, ist hier als "Störfall" einzuordnen, der in jedem Fall genauer zu untersuchen wäre (Nässe, Fremdkörper, herabfallende Gegenstände etc.).

3.4.1 Rollendes Rad, gebremst und gelenkt

Für die reinen Befahrbarkeitsversuche stand eine Verschleißprüfmaschine für Estriche zur Verfügung, die in der FMPA BW auf der Basis einer Untersuchung über "Die mechanische Beanspruchung von Industrie-Estrichböden durch Flurförderzeuge" /1/ entwickelt wurde.

Die Verschleißmaschine entsprechend Bild 1 weist einen Drehteller auf, der den eigentlichen Prüfkörper trägt: Einen stählernen Kreisring mit abnehmbarer seitlicher Schalung für Estriche bis 50 mm Dicke. Drehteller samt Probekörper drehen sich unter einem Hilfsrahmen hindurch, der die Pneumatik zur Belastung des stationären Rades trägt. Das Rad bewegt sich auf dem kreisringförmigen Probekörper auf einer Kreisbahn mit $R = 700$ mm und kann mit einer Vertikalkraft von bis zu $F_v = 15$ KN belastet und einer Horizontalkraft von bis zu $F_H = 0,7 \cdot F_v$ über eine Wirbelstromkupplung gebremst werden. Der Drehteller macht 38 U/min, was einer Geschwindigkeit von $v = 10$ km/h entspricht. Es standen Vulkollan- und Polyamidräder mit einem Durchmesser von 125 mm und einer Breite von 40 mm zur Verfügung. Zur Vermeidung einer übermäßigen Erwärmung mit nachfol-

gender Zerstörung der Räder müssen Beanspruchungszyklen von 7,5 min Dauer eingehalten werden:

2,5 min Befahren (= 95 Umläufe)

5,0 min Abheben (zur Abkühlung)

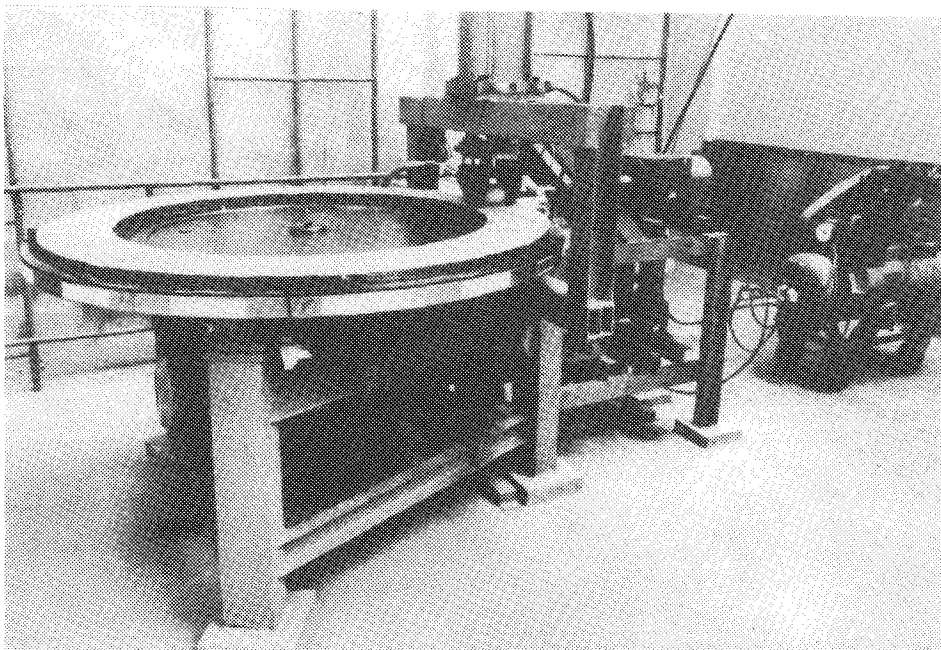


Bild 1: Verschleißmaschine der FMPA

Pro Arbeitstag (= 8 h) sind somit 64 Zyklen mit insgesamt 6080 Umläufen bzw. Übergängen möglich. (Ein Betrieb der Maschine ist ohne Aufsicht bzw. außerhalb der Arbeitszeiten nicht zulässig). Nähere Angaben zur Maschine sind /2/ zu entnehmen.

Randbedingungen für die Befahrbarkeitsversuche

- Untergrund für die Beschichtungen:

ZE 30, Größtkorn 8 mm, sandgestrahlte Oberfläche

- Belastung der Räder:

Vulkollan: $F_v = 2 \text{ KN}$, $F_H = 0,28 \cdot F_v = 0,56 \text{ KN}$

Polyamid: $F_v = 5 \text{ KN}$, $F_H = 0$

- Beanspruchung der Beschichtungssysteme:

durch Vulkollan-Rad: 125 000 Übergänge (= 5 Jahre
à 250 Tage mit je 100 Übergängen)
Mittlere Pressung von $p \approx 3 \text{ N/mm}^2$

durch Polyamid-Rad: 25 000 Übergänge (= 1 Jahr à
250 Tage mit je 100 Übergängen)
Mittlere Pressung von $p \approx 35 \text{ N/mm}^2$

Zur Begrenzung der Versuchsdauer (150 000 Übergänge dauern über 5 Wochen!) ist zunächst versucht worden, mit höheren Radlasten bzw. Pressungen zu fahren. Dabei ergab sich jedoch ein derart hoher Reifenverschleiß, daß ein zügiger Versuchsablauf unter definierten Randbedingungen nicht sicher zu stellen war. Als sinnvolle Radlast ergab sich beim Vulkollan-Rad (Bremsen + Lenken) 50 % der Nenn-Traglast von 4000 N, beim Polyamid-Rad (nur Lenken) etwa 83 % der Traglast von 6000 N.

Die vergleichsweise geringe Bremskraft von 28 % der Normalkraft ergab sich aus der Bedingung, daß das Vulkollanrad auch auf dem glattesten System nach der Abkühlphase von 5 min je Zyklus nicht rutschen durfte.

Außerdem ist zunächst versucht worden, durch das Aufteilen des kreisringförmigen Probekörpers in 4 Segmente, 4 Systeme gleichzeitig zu prüfen. Nach dem Versagen des ersten Systems mußte jedoch der Versuch abgebrochen werden, weil die entstandenen Unebenheiten die Beanspruchung der benachbarten Systeme beeinflusste und zu Schäden an der Maschine geführt haben. Daraufhin mußte für jedes System ein gesonderter Ring hergestellt und geprüft werden.

3.4.2 Weitere kritische Beanspruchungen

Eine Grundvoraussetzung für eine Befahrbarkeit ist die Beständigkeit eines Systems gegen die üblichen Kraftstoffe (Benzin, Dieselöl) sowie gegen Schmier- und Hydrauliköle (Gruppen 1 und 4 der BPG).

Da die chemische Beständigkeit von Kunststoffen bzw. -Harzen in ursächlichem Zusammenhang steht mit deren Vernetzungsgrad, sind vor allem die hochbeständigen Stoffe hochvernetzt und entsprechend spröd-elastische (ähnlich wie Glas). Ein spröd-elastisches Verhalten ist gleichbedeutend mit einer ausgeprägten Schlag- und Ritzempfindlichkeit: Anhand von modifizierten Reißüberbrückungsversuchen - siehe Ziffer 3.3.1 - läßt sich der schädliche Einfluß von zerkratzten Oberflächen nachweisen, besonders bei Systemen, die wegen behinderten Schrumpfens bereits ohne äußere Beanspruchung unter Zugspannungen stehen.

Die Schlagempfindlichkeit als Maß für die Empfindlichkeit gegenüber herabfallenden oder hart aufgesetzten Gegenständen, ist in einer abgewandelten "Kugelschlag-Prüfung" mit dem "ERICHSEN Kugelschlag-Prüfgerät Typ 304" untersucht worden. Dabei läßt man einen durch ein senkrechtes Rohr geführten, zylindrischen Fallbolzen mit halbkugeliger Aufprallfläche aus verschiedenen Höhen auf die zu untersuchende Oberfläche fallen. Das Aussehen der Aufprallstelle ergibt zusammen mit der Schlagenergie ($E_{pot} = F_G \cdot h$) einen Hinweis auf die Schlagempfindlichkeit eines Systems.

Randbedingungen für die Kugelschlagversuche

- Gewicht des Fallbolzens: $F_G = 9,08 \text{ N}$
- Durchmesser der halbkugeligen Aufprallfläche $D_K = 15,8 \text{ mm}$.

Im Zusammenhang mit einer Befahrbarkeit ist ein weiterer Punkt von Bedeutung, der von der Grundkonzeption eines Systemaufbaus abhängig ist: Wie bereits unter Ziffer 2.3 erwähnt (Besonder-

heiten im Aufbau), weisen die Systeme 7 (VE/M-56-3L) und 8 (VE/A-56-3L) keine Schwimm- oder Ausgleichsschicht auf. Bei derartigen Aufbauten ohne schubweiche Zwischenschicht ist eine Rißüberbrückung ohne Ablösung vom Untergrund in der Rißumgebung grundsätzlich nicht möglich! Im Anhang 2 sind die Vorgänge bei der Rißentstehung im (Beton-) Untergrund schematisch aufgezeigt, wobei zu beachten ist, daß zwischen den beiden Extremen (mit und ohne Schwimmschicht) jede Zwischenstufe - je nach Wirksamkeit der Schwimmschicht - denkbar ist. Dies bedeutet, daß das alleinige Vorhandensein einer Schwimmschicht nicht zwangsläufig zur Vermeidung von Ablösungen führt.

Beim Befahren können solche örtlichen Enthaftungen zwischen Beschichtung und Untergrund Ausgangspunkte für Folgeschäden sein, wobei die Größe der enthaf teten Zonen zu beiden Seiten eines Risses von ausschlaggebender Bedeutung ist: Bleibt die Breite der enthaf teten Zone in der Größenordnung der Systemdicke (wenige mm), dann sind Folgeschäden durch ein Befahren eher unwahrscheinlich. Erreichen die enthaf teten Zonen jedoch ein Vielfaches der Systemdicke (einige cm), dann muß beim Befahren infolge von Walkarbeit zunächst mit einer Vergrößerung der enthaf teten Zonen und später mit Undichtigkeiten (Ermüdungsbrüche) gerechnet werden.

Anhand von Abreißversuchen in Anlehnung an die DIN ISO 4624 ist versucht worden, einen Hinweis auf die Größe enthaf teteter Bereiche zu erhalten: Hierzu sind die Haftzugfestigkeitswerte (Stempel-Ø 20 mm) über einem Riß mit den Werten abseits vom Riß verglichen worden.

3.5 Sicherheitsbetrachtungen

Eine Beschichtung für den Gewässerschutz darf vor allem beim Begehen und Befahren keine Ursache für Unfälle sein, deren Folgen sie gerade zu vermeiden helfen soll. Es sind deshalb auch an die aktive Verkehrstauglichkeit, speziell die Rutschfestigkeit, gewisse Mindestanforderungen unverzichtbar. Im

vorliegenden Fall erweist sich dies jedoch als besonders schwierig, weil alle denkbaren Kombinationen der tatsächlich vorkommenden Materialien für Deckschichten, Räder bzw. Rollen und Schuhsohlen zu überprüfen wären. Aber selbst für den Straßenverkehr, wo die infrage kommenden Materialien überschaubar bleiben (Beton, Asphalt, Reifengummi und deren Variationen); sind entsprechende Mindestanforderungen kaum quantifizierbar, was hier allerdings durch die Witterungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit von Reibungsbeiwerten begründet ist.

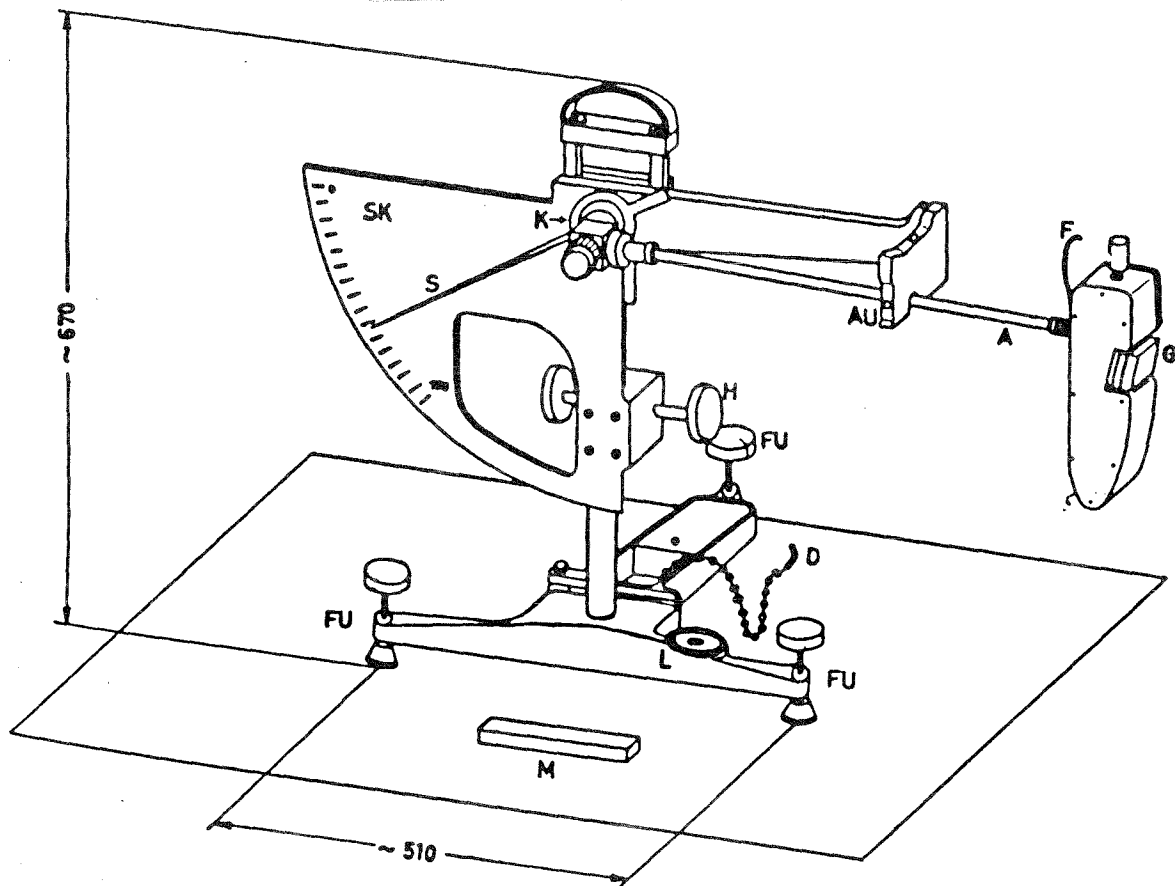
Nach unserem Kenntnisstand gibt es lediglich für die Oberflächen von Betonfahrbahnen Richtwerte, die jedoch wiederum primär zur Bestimmung des Einflusses von Beton-Zusatzmitteln festgelegt wurden.

Das hierzu verwendete "SRT"-Prüfgerät (Skid Resistance Tester) ist in Bild 2 dargestellt (Prinzipskizze) und in /3/ ausführlich beschrieben.

Die uns zur Verfügung stehende BAM-Version des Gerätes ist mit einem Gleitkörper (G) ausgerüstet, den die BAM (Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin) vorschreibt und vertreibt. Der Gleitkörper trägt einen Vollgummiblock, der als Referenz bzw. als Ersatz für Kfz-Reifenmaterial dient. Andere Materialien sind nicht vorgesehen, so daß auch keine entsprechenden Vergleichswerte vorliegen.

Die Rutschfestigkeitsmessungen werden normalerweise auf nassen Betonoberflächen durchgeführt, wobei brauchbare Betone einen "SRT-Wert" von 70-80 erreichen müssen. Diese Werte dürfen auch bei Verwendung von Beton-Zusatzmitteln nicht unter 60 absinken. Diese Meßwerte sind dimensionslose Vergleichsgrößen, die folgendermaßen zustande kommen: Das ungebremste, frei durchschwingende Pendel erreicht auf der in Bild 2 erkennbaren Skala den Wert "0". Auf der nassen Oberfläche eines optimalen Fahrbahn-Betons wird etwa der Wert "100" erreicht, wobei zu

beachten ist, daß der Meßwert auch von der Oberflächentextur abhängt.



FU Fußschrauben des Basisgestells
L Dosenlibelle
SK Skalenschild
K Lagerkopf
A Pendelarm
S Schleppzeiger
AU Auslöseknopf
H Handrad zum vertikalen Verschieben der Einheit Skalenschild/Lagerkopf

G Gleitkörper gemäß Abb. 2
F Federnder Hebel zum Anheben des Gleitkörpers
D Distanzstück zur Grobeinstellung der Reiblänge
M Maßstab für die Reiblänge mit der Aufschrift „Gemäß Arbeitsanweisung der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen“, siehe Abb. 4

Bild 2: SRT-Gerät

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Rißüberbrückung an modifizierten BPG-Platten

Bei den hier angesprochenen Rißüberbrückungsversuchen sind nur die Modifikationen a) - c) der unter Ziffer 3.3.1 vorgeschlagenen Änderungen berücksichtigt worden (ein Riß, Beschichtung auf die Stirnseiten der Platten herumgeführt, Abstand der unteren Auflager 4 cm). Der zeitliche Ablauf der Versuche entsprach hingegen exakt den Vorgaben der BPG (0,2 mm Rißweite in 10 bis 15 min).

System	Befund	F_R (KN)
1 (PH/M-35-3D)	-	-
2 (EP/M-45-1L)	Bruch bei < 0,2 mm (3 von 3)	13,5
3 (EP/M-33-SL)	kein Bruch bis 0,2 mm (3 von 3)	20,0
4 (EP/A-34-1L)	kein Bruch bis 0,2 mm (3 von 3)	12,0
5 (EP/A-56-1L)	Bruch bei < 0,2 mm (2 von 3)	22,0
6 (VE/M-37-2D)	kein Bruch bis 0,2 mm (3 von 3)	18,0
7 (VE/M-56-3L)	kein Bruch bis 0,2 mm (2 von 3)	35,0
8 (VE/A-56-3L)	Bruch bei < 0,2 mm (3 von 3)	31,0

Tabelle 1): Ergebnisse der modifizierten Rißüberbrückungsversuche

Erläuterungen zu den in Tabelle 1 aufgeführten Ergebnissen

- Zu System 1:

Bisher ungültige Ergebnisse wegen Verwendung von überalterten Materialien (Verfallsdatum überschritten).

- Zu System 2:

Frühzeitiges Einreißen der Beschichtung von den Rändern her (ab etwa 0,1 mm) deutet auf eine ausgeprägte Empfindlichkeit gegen Kerbspannungen hin (Ritz- bzw. Verletzungsempfindlichkeit allgemein)

- Zu System 3:

Sonderaufbau mit Spezialeinlage. Trotz relativ hoher Reaktionskräfte (F_R) große Reserven bei der Rißüberbrückung (auch bei hohen Geschwindigkeiten).

- Zu System 4:

Kombination aus einer sehr weichen und wirksamen Schwimmschicht mit einer dünnen und vor allem ausreichend dehnfähigen Deckschicht (minimale Armierung).

- Zu System 5:

Gleichzeitiger, schlagartiger Bruch von Beschichtung und Beton in 2 von 3 Fällen, vorher kein Riß im Beton erkennbar. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, daß die Deckschicht und/oder die Laminatschicht keine höhere Dehnfähigkeit aufweist, als Beton! (Die Bruchdehnung von Beton liegt in der Größenordnung von $\epsilon_B \approx 0,1 \text{ ‰}$). Die Grundvoraussetzung für eine Rißüberbrückung ist damit nicht erfüllt (siehe hierzu auch Anhang 2).

- Zu System 6:

Nicht sehr weiche, aber in Verbindung mit der stark armierten und ausreichend dehnfähigen Deckschicht sehr wirksame Schwimmschicht.

- Zu System 7:

In einem von 3 Fällen schlagartiger Bruch der Beschichtung (mit lautem Knall), gleichzeitig mit dem Beton, der kurz zuvor noch keinen Riß erkennen ließ! Grenzfall ähnlich System 5, bei dem eine starke Armierung zwar für extrem hohe Reaktionskräfte bzw. für eine beachtliche Zugfestigkeit sorgt, die aber bei nur knapp ausreichender Dehnfähigkeit nichts

nützt.

- Zu System 8:

Ableitfähige Variante von System 7, die sich von diesem lediglich durch die Beigabe eines Spezialpulvers zum Deckschichtharz unterscheidet. Dadurch wird das Deckschichtmaterial offensichtlich noch "kürzer", d. h. weniger dehnfähig: Bei allen 3 Proben schlagartiger und lautstarker Bruch der Beschichtung, gleichzeitig mit dem Beton, der kurz vorher noch keine Risse aufwies.

Bei Materialien, die beim Abbinden bzw. Aushärten zu nennenswertem Schrumpfen neigen (z. B. Vinylester-Harz), ist zu beachten, daß eine an sich ausreichende Dehnfähigkeit durch eine Behinderung des Schrumpfens stark eingeschränkt sein kann.

4.2 Haftzugfestigkeiten im Rißbereich

Bei den Systemen, die im modifizierten Rißüberbrückungsversuch nicht gerissen sind, wurden je Platte 3 Prüfstempel \varnothing 20 mm auf die Beschichtung unmittelbar über dem Riß im Beton geklebt. In den ungestörten Bereichen neben dem Riß sind 4 weitere Prüfstempel (je 2 auf jeder Plattenhälfte) aufgeklebt worden. In der Tabelle 2 sind die Haftzugfestigkeitswerte (Mittelwerte) aus möglicherweise gestörten Bereichen (Riß im Untergrund, ev. Enthftung) denen aus ungestörten Bereichen gegenübergestellt.

System	ungest. Bereich	Rißbereich	Differenz
4 (EP/A-44-1L)	3,01	2,93	-
5 (EP/A-56-1L)	1,19	1,07	-
6 (VE/M-37-2D)	2,00	2,07	-
7 (VE/M-56-3L)	2,03	1,60	- 21 %

Tabelle 2: Haftzugfestigkeitswerte in N/mm² (Mittelwerte)

Nur bei System 7 (VE/M-56-3L) zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen ungestörten und möglicherweise gestörten (Riß-) Bereichen: Bei einer Prüfstempelfläche von 314 mm² machen 21 % etwa 66 mm² aus.

Wenn davon ausgegangen wird, daß die Prüfstempel jeweils mittig über dem Riß angeordnet waren, entsprechen die 66 mm² einem Streifen von 20 mm Länge (= Durchmesser eines Prüfstempels) und 3,3 mm Breite. Es kann demnach nur in einer Zone von etwa 1,7 mm Breite zu beiden Seiten des Risses im Untergrund zu einer Auflösung des Verbundes zwischen Beschichtung und Untergrund gekommen sein. Es ist nur schwer vorstellbar, daß ein so schmaler Streifen ohne Verbund ein Ausgangspunkt für nennenswerte Folgeschäden in der Beschichtung sein kann, selbst wenn diese befahren wird.

4.3 Befahrbarkeitsversuche

Entgegen den ursprünglichen Erwartungen konnte bei keinem der 8 untersuchten Systeme ein fortschreitender Verschleiß in dem Sinne nachgewiesen werden, daß die Gesamtdicke des Systems bzw. die Schichtdicke der direktbefahrenen Deckschicht meßbar abgenommen hätte: Trotz des Einsatzes von speziellen Meßbrücken, die von festgelegten Meßpunkten aus die exakte Aufnahme von Querprofilen (Genauigkeit im Bereich von 1 µm) erlauben, konnten weder infolge der Beanspruchung durch das Vulkollan-Rad noch infolge der Beanspruchung durch das Polyamid-Rad Veränderungen gemessen werden, die über die Meßgenauigkeit hinausgegangen wären. Die Fahrspur wurde meist nur dadurch erkennbar, daß die ursprünglich glänzenden Oberflächen hier ein mattes Aussehen annahmen, das in der Regel von anhaftendem Radabrieb herrührte. Vor allem die Vulkollan-Räder waren einem erheblichen Verschleiß unterworfen, so daß jeweils nach etwa 30.000 Übergängen ein neues Rad benötigt wurde.

Aus den Bildern 3.1 bis 3.6 im Anhang 3 ist ersichtlich, wie sich bei einzelnen Systemen ein durch direktes Befahren be-

dingtes Versagen darstellt. In der Tabelle 3 sind die Übergänge zusammengestellt, die die Systeme bis zum Versagen ertragen haben.

System	Vulkollan-Rad	Polyamid-Rad
1 (PH/M-35-3D)	125.000	16.000
2 (EP/M-45-1L)	125.000	18.000
3 (EP/M-23-SL)	< 10	-
4 (EP/A-44-1L)	80.000	-
5 (EP/A-56-1L)	125.000	200
6 (VE/M-37-2D)	125.000	10.000
7 (VE/M-56-3L)	125.000	25.000
8 (VE/A-56-3L)	125.000	25.000

Tabelle 3: Anzahl der Übergänge bis zum Versagen

Erläuterungen zu den Ergebnissen der Befahrbarkeitsversuche:

- Zu System 1:

Auf Bild 3.1 im Anhang 3 ist deutlich erkennbar, daß die Fahrspur in der Umgebung der Schadstelle keinerlei Anzeichen für eine Schädigung erkennen läßt. Die abgebildete Schadstelle ist eine von insgesamt 3 unregelmäßig über die Länge der Fahrspur von etwa 4,4 m verteilten Schadstellen unterschiedlicher Größe, die eher als singuläre Punkte bzw. als zufällige Schwachstellen anzusehen sind.

- Zu System 2:

Aus Bild 3.2 geht deutlich hervor, daß es sich hier um ein systemtypisches Schadensbild handelt, das nicht auf wenige Punkte beschränkt bleibt: Die gesamte Fahrspur zeigt Schäden, die örtlich nur unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Die auf dem Bild dargestellte, ausgeprägte Schadstelle weist auf einen interessanten Umstand hin: Der Grund für den scheinbar erst durch das Polyamidrad erzeugten Schaden liegt tiefer. Die ausgeprägte Schadstelle ist seitlich relativ scharf begrenzt durch die schwach erkennbaren Konturen der Fahrspur vom Vulkollanrad. Die geringere Aufstandsweite des Polyamidrades ist hier deutlich erkennbar aus dem dunklen Streifen, erzeugt durch vom Polyamidrad verschleppten Schmutz aus offenen Schadstellen. Die Schädigung des Systems muß demnach viel früher im Unterbau (Schwimm- und/oder Laminatschicht) durch die Einwirkung des Vulkollanrades begonnen haben und ist durch das Polyamidrad nur vollends aufgedeckt worden.

- Zu System 3:

Bereits nach wenigen Übergängen mit dem Vulkollanrad ist die Deckschicht in Schollen eingebrochen, obwohl die vom Hersteller des (2-lagigen) Spezialgewebes angegebene Druckfestigkeit nicht überschritten worden ist. Die durch das Vulkollanrad erzeugte Pressung von etwa 3 N/mm^2 hat zusammen mit den Lenk- und Bremskräften das System erheblich überfordert (Bild 3.3 im Anhang 3).

- Zu System 4:

Das Bild 3.4 zeigt regelmäßige Einbrüche einer dünnen Deckschicht auf einer extrem weichen Schwimmschicht, zwischen denen nur eine ebenfalls dünne, mit einer Minimalarmierung von 45 g/m^2 versehene Laminierungsschicht angeordnet ist. Durch die Walkarbeit des Vulkollanrades wurden ab etwa 80.000 Übergängen erhebliche Mengen des weichen Schwimmschichtmaterials durch die Risse an die Oberfläche gefördert (deshalb sind die Risse auf dem Bild auch so deutlich erkennbar).

- Zu System 5:

Bei diesem (ableitfähigen) System führten ganz offensichtlich erst die hohen Pressungen des Polyamidrades (etwa 35

N/mm² gegenüber etwa 3 N/mm² beim Vulkollanrad) zum Versagen des Systems, das sich in einem sauberen Ablösen von etwa 1-Pfennig-großen Schuppen der extrem spröden Deckschicht von der darunter liegenden Leitlackschicht äußerte. Leitlackschicht und Unterbau erschienen völlig intakt. Im Bild 3.5 ist deutlich zu sehen, daß das Schadensbild - anders als etwa beim System 2 - eng auf die erheblich schmalere Fahrspur des Polyamidrades beschränkt bleibt.

- Zu System 6:

Wie auf Bild 3.6 deutlich zu erkennen ist, gleicht das Schadensbild in den wesentlichen Punkten dem des Systems 2. Auch hier hat das Polymidrad einen offensichtlich bereits vom Vulkollanrad im Unterbau erzeugten Schaden vollends zu Tage gefördert.

- Zu den Systemen 7 und 8:

Diese beiden Systeme - System 8 ist die ableitfähige Variante von System 7 - haben den kompletten Befahrbarkeitsversuch überstanden, ohne daß irgendwelche schädlichen Veränderungen festzustellen gewesen wären.

4.4 Kugelfallversuch

Die Empfindlichkeit eines Systems gegen Schlag (herabfallende Gegenstände, hartes Aufsetzen von Behältern etc.) ist an der ertragbaren Fallhöhe eines Gegenstandes von bestimmter Form und Gewicht zu erkennen.

Der hier verwendete Fallbolzen weist ein Gewicht auf von $F_G = 9,08$ N und eine halbkugelige Aufprallfläche mit einem Durchmesser von $D_K = 15,8$ mm.

In der Tabelle 4 sind die Fallhöhen in cm angegeben, die bei den einzelnen Systemen zu nicht mehr zu vernachlässigenden Schäden an der Oberfläche des Systems geführt haben, die bei einer zusätzlichen Beanspruchung durch Befahren als Ausgangs-

punkte für Undichtigkeiten anzusehen sind (Stadium 1, sichtbarer Abdruck mit konzentrischen Rissen). Als Stadium 2 ist sofortige Undichtigkeit zu verstehen, die an konzentrischen und radialen Rissen an der Aufprallstelle zu erkennen ist. Die Deckschicht ist dann spinnennetzartig gerissen.

System	Stadium 1 (geschädigt)	Stadium 2 (undicht)
1 (PH/M-35-3D)	20 cm	> 50 cm
2 (EP/M-45-1L)	50 cm	> 50 cm
3 (EP/M-33-SL)	< 10 cm	20 cm
4 (EP/A-44-1L)	20 cm	30 cm
5 (EP/A-56-1L)	10 cm	30 cm
6 (VE/M-37-2D)	10 cm	> 50 cm
7 (VE/M-56-3L)	50 cm	> 50 cm
8 (VE/A-56-3L)	> 50 cm	-

Tabelle 4: Bis zur Schädigung (Stadium 1) bzw. bis zur Undichtigkeit (Stadium 2) ertragbare Fallhöhen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß Schlagenergien von etwa $E = F_g \cdot h \sim 2 - 5 \text{ Nm}$ zumindest zu einer beachtlichen Schädigung, in 3 der untersuchten 8 Fälle sogar zur sofortigen Undichtigkeit führen. Zum Vergleich: Ein normaler, haushaltsüblicher Hammer (500 g), der von einem Tisch von 70 cm Höhe herabfällt, entwickelt eine Schlagenergie von 3,5 Nm!

4.5 Rutschfestigkeit

In der Tabelle 5 sind die im SRT-Gerät mit dem BAM-Gleitkörper ermittelten Werte zusammengestellt. Zum Vergleich sei nochmals auf die Anforderungen an eine nasse Fahrbahnoberfläche aus Beton verwiesen, die SRT-Werte von 70 - 80 vorse-

hen. Diese Werte werden selbst bei den Systemen mit ausgeprägter Oberflächen-Strukturierung (System 1 und 8) nicht annähernd erreicht, so daß bei den untersuchten Systemen zumindest bei nasser Oberfläche von einer Rutschfestigkeit bzw. einer Verkehrssicherheit im üblichen Sinne keine Rede sein kann.

System	naß	(trocken)
1 (PH/M-35-3D)	34	(102)
2 (EP/M-45-1L)	19	(79)
3 (EP/M-33-SL)	22	(88)
4 (EP/A-34-1L)	18	(79)
5 (EP/A-56-1L)	20	(84)
6 (VE/M-37-2D)	21	(84)
7 (VE/M-56-3L)	20	(97)
8 (VE/A-56-3L)	26	(98)

Tabelle 5: SRT-Werte bei nasser und trockener Oberfläche

Die bei trockener Oberfläche ermittelten Werte sind in Klammern gesetzt, weil es zum einen keine brauchbaren Vergleichswerte gibt, und zum anderen diese Werte sehr stark vom Gleitkörper-Material abhängen: Es liegt auf der Hand, daß sich für Polyamid wesentlich weniger günstige Werte ergeben hätten, als für den hier verwendeten Vollgummi. Die "Trockenwerte" können allenfalls zu einer Abschätzung der Verkehrssicherheit trockener Beschichtungen beim Befahren mit üblichen Luftreifen herangezogen werden.

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Bei praxisnaher Interpretation der Begriffe "Begeh- und Befahrbarkeit" muß auch bzw. gerade bei Gewässerschutzsystemen berücksichtigt werden, daß derartige Nutzungserweiterungen zwangsläufig Beanspruchungen mit sich bringen, die durch ein Begehen oder ein Befahren im engeren Sinne (Beanspruchung durch Schuhwerk, durch rollende, gelenkte und gebremste Räder) nicht abgedeckt sind.

Unter Berücksichtigung der speziellen Material- und Systemeigenschaften sind zur Beschreibung einer allgemeinen Verkehrstauglichkeit unter Einschluß von Sicherheitsaspekten die Kriterien "Schlagempfindlichkeit" und "Rutschfestigkeit" mit untersucht worden. Hierzu sind -z. T. in etwas abgewandelter Form- bewährte Prüfverfahren herangezogen worden, die aussagekräftige Ergebnisse liefern können.

Auch die bisherigen Kriterien und Prüfverfahren nach den BPG sind -besonders der Reißüberbrückungsversuch- unter dem Aspekt der Begeh- und Befahrbarkeit von Gewässerschutzsystemen überdacht worden. Die Ergebnisse von entsprechend modifizierten Versuchen machen die Notwendigkeit dieser Modifikationen deutlich.

Die auf einer Estrich-Verschleißmaschine (Bauart FMPA BW) durchgeführten, reinen Befahrbarkeitsversuche gaben Aufschluß über den Versagensmechanismus verschiedener Systeme, wobei der Einfluß des Radmaterials bzw. der Pressung genauso deutlich wurde, wie die Wirkung der Anzahl von Übergängen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen:

- Von den 8 untersuchten Systemen haben nur 4 den modifizierten Reißüberbrückungsversuch bestanden, obgleich eine der wesentlichsten Modifikationen, die erhöhte Reißöffnungsgeschwindigkeit, noch nicht berücksichtigt wurde.

- Die reinen Befahrbarkeitsversuche sind nur von 2 unter 8 Systemen ohne Einschränkung bestanden worden; bei 4 weiteren erscheint ein direktes Befahren nur unter erheblich eingeschränkten Randbedingungen (maximale Pressung, Beanspruchungsdauer) möglich.
- Gemessen an der Schlagempfindlichkeit aller Systeme müssen wohl berechnete Zweifel an einer allgemeinen "Verkehrstauglichkeit" der Systeme bei direkter Beanspruchung aufkommen.
- Dasselbe gilt auch im Hinblick auf die Rutschfestigkeit unter allgemeinen Witterungseinflüssen.

Ein direktes Befahren der derzeit zugelassenen Systeme ist demnach allenfalls unter Randbedingungen denkbar, die praktisch nur bei automatisierten Hochregallagern ohne Anschluß an sonstige Verkehrswege kontrollierbar einzuhalten sind. Aber selbst unter derart "idealen" Randbedingungen ist zu berücksichtigen, daß offensichtlich auch eine eng gefaßte, direkte Befahrbarkeit im Widerspruch steht zu einer ausreichenden Fähigkeit zur Rißüberbrückung!

Es liegt in der Natur spröder Stoffe, daß sie bei Überbeanspruchung mehr oder weniger schlagartig, zumindest ohne rechtzeitig erkennbare Anzeichen, versagen. Ein derartiges Verhalten steht im krassen Gegensatz zu der im Bauwesen vertretenen Sicherheitsphilosophie, nach der ein nie völlig auszuschließendes Versagen eines Systems rechtzeitig erkennbar sein muß. Im vorliegenden Fall erscheint es daher unumgänglich, direkte mechanische Beanspruchungen von dem meist extrem spröden, chemikalienbeständigen Deckschichten durch die Anordnung geeigneter Schutzschichten fernzuhalten. Dies gilt vor allem dann, wenn gleichzeitig an eine ausreichende Fähigkeit zur Rißüberbrückung und eine allgemeine Verkehrstauglichkeit zu denken ist.

D. Zier

B. Kipp

Literaturhinweise

- /1/ F. Beisteiner und E. Maisch
Die mechanische Beanspruchung von Industrie-Estrichböden durch Flurförderzeuge, Sonderdruck aus "Fördern und Heben", 26. Jahrgang, Nr. 13, Oktober 1976

- /2/ W. Manns, H. Schneider und H. Elsässer
Simulierung der Verschleißbeanspruchung von Estrichen im Industriebau durch Flurförderzeuge, Sonderdruck aus "Boden Wand Decke", Heft 12/1982

- /3/ W. Teepe
Mechanische Beanspruchung der Kunststoffe im Massivbau, Kunststoffe, Band 52, Heft 11/1962

- /4/ H. Klopfer
Eine Theorie der Rißüberbrückung durch Beschichtungen, B + B, 5. Jahrgang, Nr. 2/1982

Spontane Rißentstehung in einem auf reinen Zug beanspruchten Betonquerschnitt.

1. Unbewehrter Querschnitt

1.1 Verwendete Größen

- σ_{BZ} : Zug-Bruchspannung des Betons in N/mm^2
 ϵ_{BZ} : Zug-Bruchdehnung des Betons in m/m ($\hat{=} 1$)
 E_B : E-Modul des Betons in N/mm^2 ($\hat{=} \sigma_{BZ}/\epsilon_{BZ}$)
 A_B : Querschnittsfläche des Betons in m^2
 ρ_B : Dichte des Betons in to/m^3 ($= 10^{-9} N \cdot s^2/mm^4$)
 l_0 : Länge des Beton-Zuggliedes in m
 Δl_B : Elastische Zug-Bruchdehnung des Betons in m
 v_R : Spontane Rißöffnungsgeschwindigkeit in m/s
 w_R : Rißweite in m
 t_R : Rißöffnungsdauer in s

1.2 Annahmen

- Das Beton-Zugglied werde mit sehr kleiner Geschwindigkeit bis zum Bruch gezogen ($\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt \sim 1/d$), so daß die Rißweite nach dem Bruch der elastischen (Rück-) Verformung des Betons entspricht ($w_R = \Delta l_B$) und die Öffnungsgeschwindigkeit des spontan entstehenden Risses nicht meßbar von der Beanspruchungsgeschwindigkeit überlagert wird!
- Die elastische Rückverformung des Betons nach dem Bruch erfolge in Form einer (stark gedämpften) Sinusschwingung; es wird also rein elastisches Verhalten des Betons unterstellt.

Aufgrund dieser Annahmen wird das Problem stark vereinfacht auf die Frage reduziert, wie rasch sich die Rißufer einer gespannten, elastischen Feder nach dem Durchtrennen der Feder voneinander entfernen. Zur Ermittlung der Größenordnung der Rißöffnungsgeschwindigkeit ist diese Modellvorstellung brauchbar.

1.3 Rißöffnungsgeschwindigkeit v_R

1.3.1 Maximale Reißöffnungsgeschwindigkeit $\max v_R$

Die maximale Reißöffnungsgeschwindigkeit $\max v_R$ läßt sich anhand eines Energievergleichs (Spannungsenergie kurz vor dem Bruch = Kinetische Energie kurz nach dem Bruch) ermitteln:

$$\max E_{\text{pot}} = \max E_{\text{kin}} \quad (1)$$

Die maximale Spannungsernergie $\max E_{\text{pot}}$ wird kurz vor dem Bruch erreicht:

$$\max E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} D \cdot s^2 \quad (2)$$

$$\text{mit} \quad s = \Delta l_B \quad (3)$$

$$\text{und} \quad D = \frac{\sigma_{BZ} \cdot A_B}{\Delta l_B} \quad (4)$$

ergibt sich aus (2)

$$\max E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} \sigma_{BZ} \cdot A_B \cdot \Delta l_B \quad (5)$$

Die maximale kinetische Energie $\max E_{\text{kin}}$ wird kurz nach dem Bruch erreicht (beim ersten O-Durchgang der sinusförmigen Rückverformung, $\sigma_B = 0$):

$$\max E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_B^* \cdot v_R^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_B}{3} v_R^2 \quad (6)$$

(Nach Szàbo wird bei ausschließlicher Berücksichtigung der "Federmasse" nur ein Drittel davon in Rechnung gestellt; keine punktförmige Masse!)

$$\text{Mit} \quad m_B^* = \frac{m_B}{3} = \frac{1}{3} A_B \cdot l_0 \cdot \rho_B \quad (7)$$

ergibt sich aus (6)

$$\max E_{\text{kin}} = \frac{1}{6} \cdot A_B \cdot l_0 \cdot \rho_B \cdot v_R^2 \quad (8)$$

Gleichung (5) und (8) in (1) führt zu

$$\max v_R = \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{RZ} \cdot \Delta l_B}{\rho_B \cdot l_0}} \quad (9)$$

oder, mit

$$\varepsilon_{BZ} = \frac{\Delta l_R}{l_0} \quad (10)$$

schließlich zu

$$\max v_R = 1,732 \sqrt{\frac{\sigma_{RZ} \cdot \varepsilon_{RZ}}{\rho_B}} \quad (11)$$

Dimensionsbetrachtung:

Mit σ_{BZ} in N/mm^2 , ε_{BZ} in m/m und ρ_B in $N \cdot s^2/mm^4$ ergibt sich $\max v_R$ in mm/s !

($1 N = 1 kg \cdot m/s^2 \rightarrow 1 g = 10^{-3} kg = 10^{-3} Ns^2/m$;

$1 g/cm^3 = 10^{-3} Ns^2/m \cdot cm^3 = 10^{-9} Ns^2/mm^4$)

Die Rißöffnungsgeschwindigkeit $\max v_R$ ist demnach - wie σ_{BZ} , ε_{BZ} und ρ_B - eine Materialkonstante, die von den Dimensionen des Zugliedes unabhängig ist.

1.3.2 Mittlere Rißöffnungsgeschwindigkeit \bar{v}_R

1.3.2.1 Rißweite w_R

Die Rißweite w entspricht der elastischen Rückverformung der "Feder" Beton ($\hat{=}$ Amplitude der Sinusschwingung):

$$w_R = \Delta l_B \quad (12)$$

1.3.2.2 Rißöffnungsdauer t_R

Die Zeit t_R bis zur (ersten) vollständigen Öffnung des Risses entspricht einem Viertel der vollen Schwingungsdauer:

$$t_R = \frac{1}{4} \cdot T \quad (13)$$

mit
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (14)$$

und den Gleichungen (4) und (7) ergibt sich aus (13)

$$t_R = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{l_0 \cdot \Delta l_R \cdot \rho_B}{3 \sigma_{BZ}}} \quad (15)$$

Die mittlere Rioffnungsgeschwindigkeit \bar{v}_R ergibt sich zu

$$\bar{v}_R = \frac{w_R}{t_R} = \sqrt{\frac{12 \sigma_{BZ} \cdot \Delta l_R}{\pi^2 \cdot l_0 \cdot \rho_B}}$$

bzw.
$$\bar{v}_R = 1,1 \sqrt{\frac{\sigma_{BZ} \cdot \varepsilon_{BZ}}{\rho_B}} \quad (16)$$

Die Riweite w_R ($\hat{=}$ Amplitude) hängt ebenso wie die Rioffnungsdauer t_R ($\hat{=}$ 1/4 Schwingungsdauer) von den Dimensionen des Zuggliedes ab ($w_R = f_1(\Delta l_B) = f_1(l_0)$; $t_R = f_2(l_0)$).

Die mittlere Rioffnungsgeschwindigkeit \bar{v}_R ist jedoch - wie $\max v_R$ - eine Materialkonstante! (ρ ist auch hier in Ns^2/mm^4 einzusetzen!)

2. Bewehrte Querschnitte

2.1 Verwendete Groen (zusätzlich zu 1.1)

σ_s	: Stahl-Zugspannung in N/mm^2
ε_s	: Stahl-Zugdehnung in m/m
E_s	: E-Modul des Stahls in N/mm^2
n	: Verhältnis $E_s/E_B = n$
A_s	: Stahl-Querschnittsfläche in m^2
μ	: Bewehrungsgrad ($= A_s/A_B$) in m^2/m^2
d_s	: Durchmesser des Bewehrungsstahls in mm
τ	: Verbundspannung Stahl-Beton in N/mm^2
ρ_s	: Dichte des Stahls in to/m^3 ($\hat{=}$ $10^{-9} \text{Ns}^2/\text{mm}^4$)
F_{BZ}	: Zug-Bruchkraft des Betons in N
F_{s1}	: Zugkraft im Stahl <u>vor</u> dem Bruch im Beton in N
F_{s2}	: Zugkraft im Stahl <u>nach</u> dem Bruch im Beton in N
Δl_s	: Elastische Dehnung des Stahls infolge F_{BZ} in mm
l_{ov}	: Länge ohne Verbund in mm .

2.2 Zustand I (kurz vor dem Trennbruch im Beton)

Es wird die Länge eines bewehrten Zuggliedes betrachtet, auf

der ein Riß entsteht ($l_0 \hat{=} \text{Rißabstand}$)

Unmittelbar vor der Rißentstehung (Trennbruch im Beton) gilt:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{BZ}, \quad (17)$$

d. h., Stahl- und Betondehnung sind gleich.

Die entsprechenden Zugspannungen ergeben sich zu

$$\text{Beton:} \quad \sigma_{BZ} = E_B \cdot \varepsilon_{BZ} \quad (18)$$

$$\text{Stahl:} \quad \sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_{BZ} = n \cdot \sigma_{BZ} \quad (19)$$

Die zugehörigen Zugkräfte sind

$$\text{Beton:} \quad F_{BZ} = \sigma_{BZ} \cdot A_B \quad (20)$$

$$\text{Stahl:} \quad F_{s1} = \sigma_s \cdot A_s \quad (21)$$

2.3 Zustand II (Kurz nach dem Trennbruch im Beton)

Damit ein Riß im Beton entstehen kann - der Stahl reißt nicht - muß sich der Beton im Rißbereich gegen den Stahl verschieben; es muß sich also der Verbund Stahl - Beton auf einer bestimmten Länge l_{0V} lösen!

Die elastische Verkürzung des Betons nach dem Bruch (Δl_B) kann nur auf dieser Länge l_{0V} erfolgen:

$$\Delta l_B = l_{0V} \cdot \varepsilon_{BZ} \quad (22)$$

Nach dem Trennbruch im Beton muß der Stahl zusätzlich die Zugkraft des Betons (F_B) aufnehmen und wird dadurch - ebenfalls nur auf der Länge l_{0V} - zusätzlich gedehnt:

$$\Delta l_s = l_{0V} \cdot \Delta \varepsilon_s; \quad (23)$$

mit
$$\Delta \varepsilon_s = \frac{F_B}{A_s \cdot E_s} \quad (24)$$

Die Rißweite w_R setzt sich zusammen aus der elastischen Rückverformung des Betons Δl_B und der Stahldehnung Δl_s :

$$w_R = \Delta l_B + \Delta l_s \quad (25)$$

Aus (23) und (24) folgt:

$$\Delta l_s = l_{ov} \cdot \frac{F_B}{A_s \cdot E_s} \quad (26)$$

Aus (26) und (20) folgt:

$$\Delta l_s = l_{ov} \cdot \frac{A_B \cdot E_b \cdot \varepsilon_{RZ}}{A_s \cdot E_s} \quad (27)$$

mit $A_B/A_s = 1/\mu$ und $E_b/E_s = 1/n$ ergibt sich schließlich

$$\Delta l_s = l_{ov} \cdot \frac{\varepsilon_{RZ}}{n \cdot \mu} \quad (28)$$

Gleichung (28) und (22) in (25) ergibt sich die Rißweite

$$w_R = l_{ov} \cdot \varepsilon_{BZ} \left(1 + \frac{1}{n \cdot \mu}\right) \quad (29)$$

Wie groß ist nun die Länge l_{ov} , auf der der Verbund Stahl-Beton gelöst wird?

Die Verbundspannung τ sei gleichmäßig auf l_{ov} verteilt.

Die Verbundkraft F_v ergibt sich dann in der Grenzfläche Stahl-Beton zu

$$F_v = l_{ov} \cdot \pi \cdot d_s \cdot \tau \quad (30)$$

Zur Überwindung dieser -von l_{ov} abhängigen- Verbundkraft steht nur die durch den gerissenen Beton freigewordene (Beton-) Zugkraft F_B zur Verfügung:

$$F_v = F_B \quad (31)$$

Aus (30) und (31) folgt dann:

$$l_{ov} = \frac{F_B}{\pi \cdot d_s \cdot \tau} = \frac{\sigma_{Rz} \cdot A_B}{\tau \cdot \pi \cdot d_s} \quad (32)$$

Aus $A_B = A_s / \mu$ und $A_s = (\pi \cdot d_s^2) / 4$ ergibt sich

$$A_B = \frac{\pi d_s^2}{4\mu} \quad (33)$$

Gleichung (33) in (32) führt zu

$$\underline{\underline{l_{ov} = \frac{1}{\mu} \cdot d_s \cdot \frac{\sigma_{Rz}}{4\tau}}} \quad (34)$$

Gleichung (34) in (29) ergibt:

$$w_R = \frac{d_s}{\mu} \cdot \frac{\varepsilon_{Rz} \cdot \sigma_{Rz}}{4\tau} \left(1 + \frac{1}{n \cdot \mu}\right) \quad (35)$$

Die Rißweite w_R wird maßgeblich vom Bewehrungsgrad μ beeinflusst (2. Summand in der Klammer), was ebenso bekannt ist, wie die Proportionalität zwischen Rißweite w_R und Stabdurchmesser d_s (bei konstantem Bewehrungsgrad μ):

Die Rißweite w_R wird umso kleiner, je kleiner der Stabdurchmesser d_s gewählt wird.

5. Riöffnungsgeschwindigkeit

Die Riöffnungsgeschwindigkeit setzt sich in Analogie zu Gleichung (25) zusammen aus der Geschwindigkeit, mit der die elastische Rückverformung des Betons (Δl_B) und die zusätzliche Dehnung des Stahls (Δl_s) erfolgt. Beide Vorgänge laufen in Form einer starken gedämpften Sinus-Schwingung ab, so daß nur eine Näherungsrechnung möglich ist.

Der (gerissene) Beton nimmt auf der Länge l_{vo} (ohne Verbund) seine ursprüngliche Länge wieder an, die Dehnung Δl_B geht zurück:

$$\begin{aligned} \Delta l_B & \text{ geht in der Zeit } t_B \\ & \text{ auf 0 zurück: } \bar{v}_B = \Delta l_B / t_B \end{aligned} \quad (36)$$

Der Stahl wird infolge von F_B auf der Länge l_{ov} in der Zeit t_s um Δl_s gedehnt:

$$\bar{v}_s = \frac{\Delta l_s}{t_s} \quad (37)$$

Nach der folgenden Gleichung ist die Dauer T einer vollen Schwingung von der Steifigkeit D der "Feder" und der bewegten Masse m abhängig:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (=4 \cdot t) \quad (38)$$

Im betrachteten Fall ergeben sich für den Beton bzw. für den Stahl die folgenden "Federkonstanten":

$$\text{a) Beton:} \quad D_B = \frac{F_B}{\Delta l_B} = \frac{F_B}{l_{ov} \cdot \epsilon_{Bz}} \quad (39)$$

$$(34) \text{ in } (39) \text{ ergibt } D_B = \frac{\pi \cdot d_s \cdot \tau}{\epsilon_{Bz}} \quad (40)$$

$$\text{b) Stahl:} \quad D_s = \frac{F_B}{\Delta l_s} \quad (41)$$

(27) und (34) in (41) führt zu

$$D_s = n \cdot \mu \frac{\pi \cdot d_s \cdot \tau}{\epsilon_{Bz}} \quad (42)$$

Die sich entspannende "Feder" Beton bewegt auf der Länge l_{ov} nur sich selbst. Nach Szàbo wird deshalb nur ein Drittel ihrer Masse in Rechnung gestellt ($m'_B = m_B/3$):

$$m'_B = 1/3 \cdot A_B \cdot l_{ov} \cdot \rho_B \quad (43)$$

(33) und (34) in (43) ergibt

$$m'_B = \frac{\pi \cdot d_s^3 \cdot \sigma_{Bz} \cdot \rho_B}{48 \cdot \mu^2 \cdot \tau} \quad (44)$$

Bei der zusätzlichen Dehnung des Stahls infolge von F_B bewegt er sich selbst ($m'_s = m_s/3$) und die Hälfte des gerissenen Betons, jeweils auf der Länge l_{ov} :

$$m_s'' = 1/3 m_s + 3/2 m_B' \quad (45)$$

$$m_s = \frac{\pi d_s^2}{4} \cdot l_{ov} \cdot \rho_s \quad (46)$$

(34), (44) und (46) in (45) führt zu

$$m_s'' = \frac{\pi \cdot d_s^3 \cdot \sigma_{RZ}}{48 \cdot \mu \cdot \tau} \left(\rho_s + \frac{3 \cdot \rho_B}{2 \cdot \mu} \right) \quad (47)$$

Die Dauer einer vollen Sinusschwingung ergibt sich damit

a) beim Beton (Gleichung (40) und (44) in (38)):

$$T_B = 2\pi \cdot \frac{d_s}{\mu \cdot \tau} \sqrt{\frac{\sigma_{RZ} \cdot \varepsilon_{RZ} \cdot \rho_B}{48}} \quad (48)$$

b) beim Stahl (Gleichung (42) und (47) in (38)):

$$T_s = 2\pi \cdot \frac{d_s}{\mu \cdot \tau} \sqrt{\frac{\sigma_{RZ} \cdot \varepsilon_{RZ}}{48 \cdot n} \left(\rho_s + \frac{3 \rho_B}{2 \mu} \right)} \quad (49)$$

Die Amplituden der Sinusschwingungen (Δl_B beim Beton, Δl_s beim Stahl) ergeben sich zu:

$$(34) \text{ in } (22) \quad \Delta l_B = \frac{d_s}{\mu \cdot \tau} \cdot \frac{\sigma_{RZ} \cdot \varepsilon_{RZ}}{4} \quad (50)$$

$$(34) \text{ in } (28) \quad \Delta l_s = \frac{d_s}{\mu \cdot \tau} \cdot \frac{\sigma_{RZ} \cdot \varepsilon_{RZ}}{4 \cdot n \cdot \mu} \quad (51)$$

Da jeweils nur ein Viertel einer vollen Schwingung betrachtet wird (Ruhezustand-Vollauschlag) darf zur Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit jeweils nur $t = T/4$ angesetzt werden.

(50) und (48) in (36)

$$\bar{v}_B = 1,1 \sqrt{\frac{\sigma_{BZ} \cdot \varepsilon_{BZ}}{\rho_B}} \quad (52)$$

(51) und (49) in (37)

$$\bar{v}_s = \frac{15,28 \cdot \mu}{2\mu\rho_s + 3\rho_B} \sqrt{\frac{\sigma_{BZ} \cdot \varepsilon_{BZ}}{48n} \left(\rho_s + \frac{3\rho_B}{2\mu}\right)} \quad (53)$$

mit $\rho_B = 2,3 \text{ to/m}^3$ und $\rho_s = 7,85 \text{ to/m}^3$ ergibt sich

$$\rho_s = 3,4 \rho_B \quad (54)$$

(54) in (53) führt zu

$$\bar{v}_s = 1,1 \sqrt{\frac{\sigma_{BZ} \cdot \varepsilon_{BZ}}{\rho_B} \left(3,4 n + \frac{3n}{2\mu}\right)^{-1/2}} \quad (55)$$

Wie zu erwarten war, ist die Dehnungsgeschwindigkeit des Stahls vom Bewehrungsgrad μ abhängig. Bei üblichen Bewehrungsgraden in der Größenordnung von 1 % macht v_s nur etwa 3 % von v_B aus und kann vernachlässigt werden.

Die Rißöffnungsgeschwindigkeit \bar{v}_R (Mittel)

$$\bar{v}_R = \bar{v}_B + \cancel{\bar{v}_s}$$

kann deshalb einfach abgeschätzt werden als

$$\bar{v}_R \approx \bar{v}_B = 1,1 \sqrt{\frac{\sigma_{BZ} \cdot \varepsilon_{BZ}}{\rho_B}} \quad (56)$$

Hierbei sind allerdings die Reibungsverluste, die bei der Relativverschiebung zwischen Stahl und Beton auftraten, nicht berücksichtigt! Die so ermittelte Rißöffnungsgeschwindigkeit ist deshalb zu groß und kann nur zur Abschätzung der Größenordnung herangezogen werden!

Die Rißöffnungsgeschwindigkeit ist aber auch hier - wie bei einem unbewehrten Betonquerschnitt - eine Stoffkonstante!

Vorgänge bei der Rißüberbrückung in Verbundsystemen

Bei jedem Verbundsystem wie z. B. Stahlbeton oder beschichteter Beton, erfahren -eben wegen des Verbundes- beide "Verbundpartner" infolge äußerer Beanspruchung dieselben Dehnungen. Dies gilt auch für Beschichtungen von Auffangwannen, weil die Beschichtung an den Wänden hochgeführt werden muß. Derartige Aufkantungen wirken -unabhängig von der Größe der Wanne- wie Randeinspannungen für die horizontale Ebene.

Bevor irgendwo ein Riß entsteht sind demnach die Dehnungen von Beton und Beschichtung (alle Schichten des Beschichtungsaufbaus) gleich groß und gleichmäßig auf die Länge der Wanne in Beanspruchungsrichtung verteilt. In dieser Phase der "Gleichmaßdehnung" ist die beste Schwimmschicht in einem Beschichtungsaufbau wirkungslos.

Wenn nun der Beton wegen "Überdehnung" zuerst reißt, was nicht unbedingt vorausgesetzt werden kann, dann zieht er sich in Richtung auf die (festgehaltenen) Ränder der Wanne zusammen, die bisher gleichmäßig verteilte Dehnung geht zurück und die dadurch fehlende "Dehnlänge" erscheint als Rißweite im Beton. Dabei versucht der Beton denselben Vorgang auch der in aller Regel erheblich dünneren Beschichtung aufzuzwingen, was umso besser gelingt, je schubfester der Verbund ist. Das Ergebnis ist dann gleichzeitige Rißenstehung in Beton und Beschichtung.

Eine Beschichtung kann einen im Beton entstehenden Riß nur dann überbrücken, wenn sie die schlagartige Umlagerung ihrer zuvor gleichmäßig auf die Länge der Wanne verteilten Dehnung auf eine erheblich kleinere "freie Dehnlänge" erträgt. Diese "freie Dehnlänge" kann dadurch entstehen, daß sich die Beschichtung vom Untergrund losreißt (örtliche Aufhebung des Verbundes), oder -falls eine sog. Schwimmschicht vorhanden ist- die geringe Schubfestigkeit dieser Schicht die Ausbildung einer zwar nicht "freien", aber doch ausreichend großen,

mitwirkenden Dehnlänge zuläßt.

Beide Mechanismen setzen jedoch voraus, daß das Deckschicht-Material der Beschichtung eine erheblich größere Dehnfähigkeit aufweist als Beton!

Im Prinzip läßt sich ein Beschichtungsaufbau genau so rechnerisch bemessen, wie das Verbundsystem "Stahlbeton". Das Problem liegt "nur" in der Ermittlung der erforderlichen, absoluten Materialkenngrößen. Umso wichtiger ist es jedoch, daß bei einer experimentellen Überprüfung der Rißüberbrückung praxisnahe Randbedingungen erfüllt werden.



Bild 3.1: System 1 (PH/M-35-3D) nach 125.000 Übergängen mit dem Vulkollan-Rad und 16.000 Übergängen mit dem Polyamid-Rad (M = 1 : 1,2)

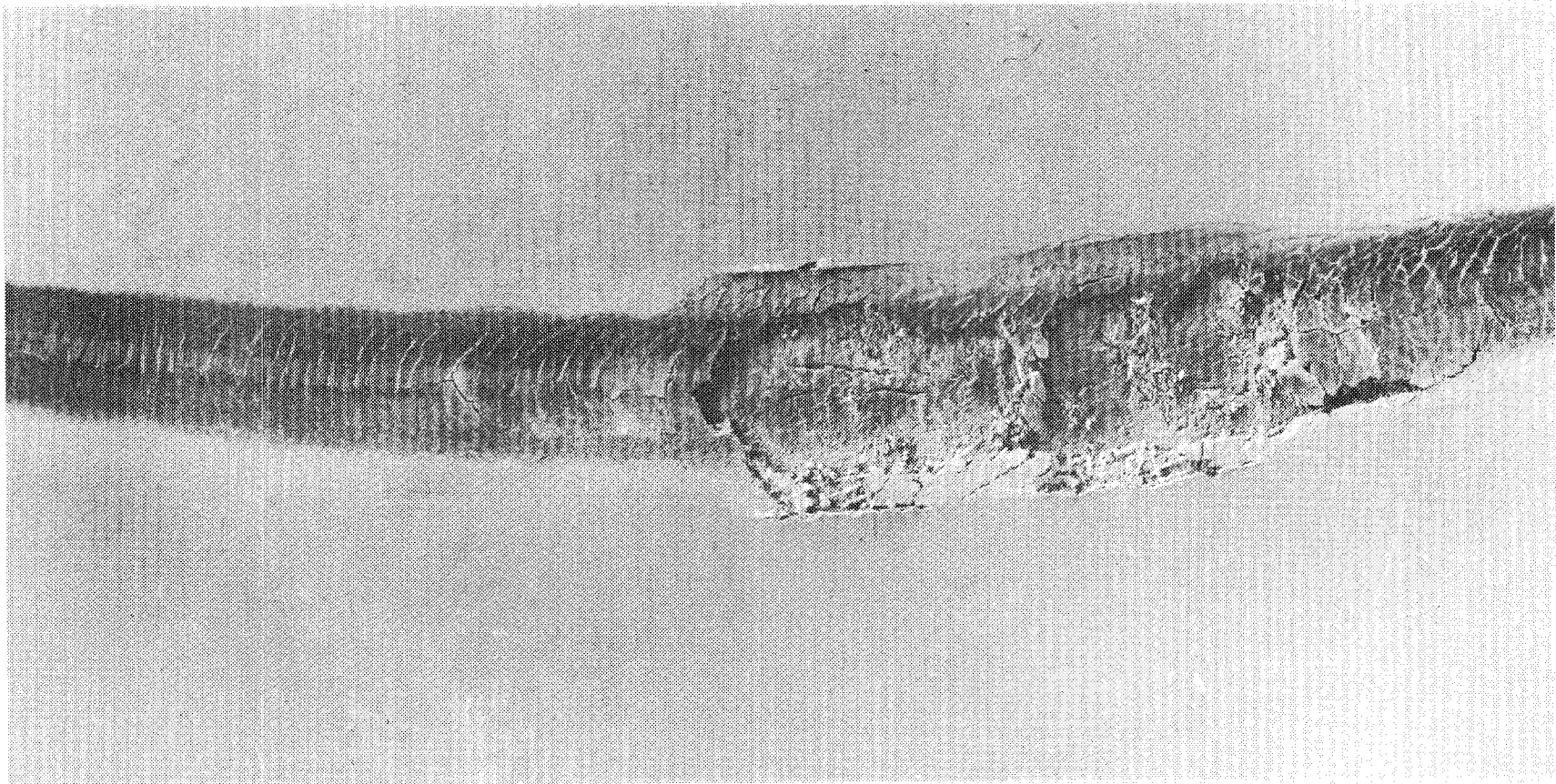


Bild 3.2: System 2 (EP/M-45-1L) nach 125.000 Übergängen mit dem Vulkollan-Rad und 18.000 Übergängen mit dem Polyamid-Rad (M = 1 : 1,2)



Bild 3.3: System 3 (EP/M-33-SL) nach wenigen (< 10) Übergängen
mit dem Vulkollan-Rad ($M = 1 : 1,4$)

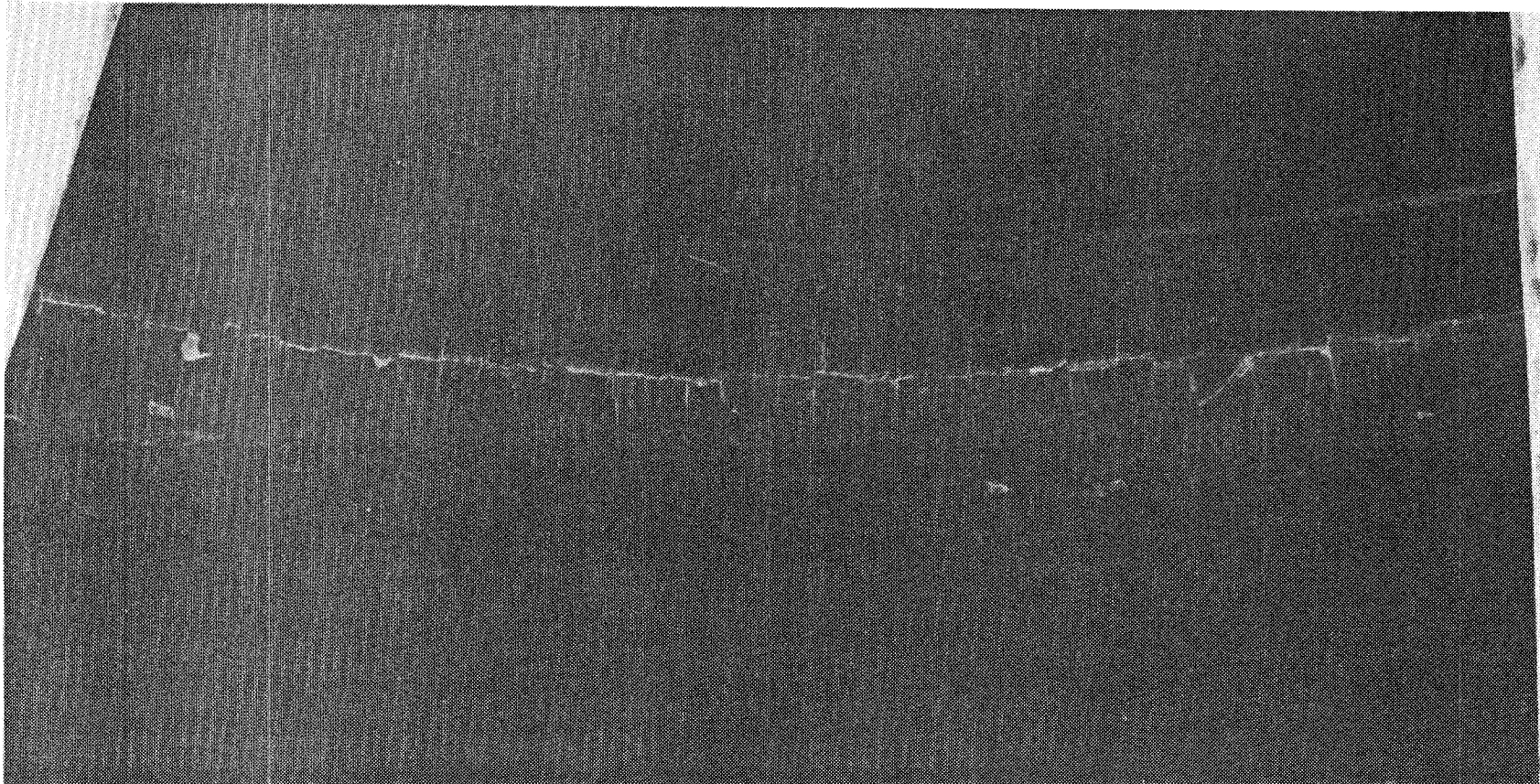


Bild 3.4: System 4 (EP/A-44-1L) nach ca. 80.000 Übergängen mit dem Vulkollan-Rad (M = 1 : 1,2)



Bild 3.5: System 5 (EP/A-56-1L) nach 125.000 Übergängen mit dem Vulkollan-Rad und 200 Übergängen mit dem Polyamid-Rad (M = 1 : 1,2)

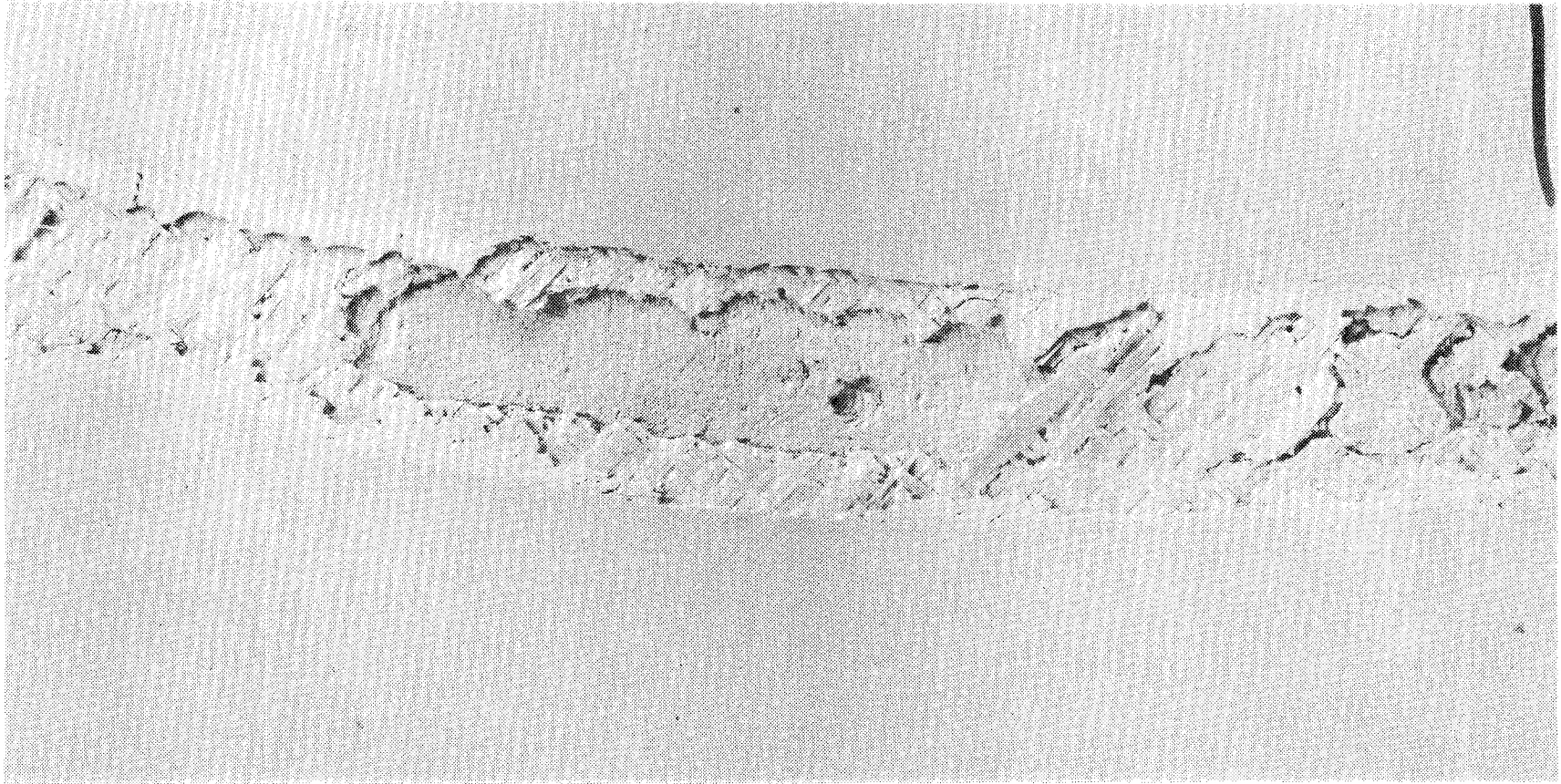


Bild 3.6: System 6 (VE/M-37-2D) nach 125.000 Übergängen mit dem Vulkollan-Rad und 10.000 Übergängen mit dem Polyamid-Rad (M = 1 : 1,2)

Recouvrement de dispositifs collecteur praticables pour le passage de personnes et véhicules

Pour une interprétation proche à la pratique du terme "praticabilité pour le passage de personnes et véhicules" il faut tenir compte du fait qu'en vue et à cause de la protection des eaux de telles extensions de l'usage causent des sollicitations qui par la simple praticabilité au sens propre du mot ne sont pas couvertes. En tenant compte des qualités spéciales du matériel et de la structure pour décrire une aptitude générale à la circulation basée sur des aspects de sécurité, les critères de la "résistance au choc" et "la résistance au glissement" ont été investigés. Même les autres critères - en particulier l'essai de franchissement de fissures - ont été revérifiés sous l'aspect de la praticabilité de systèmes de protection des eaux.

Les résultats peuvent être résumés comme suit:

- parmi les 8 structures testées seulement 4 ont passé l'essai modifié de franchissement de fissures, quoiqu'une des plus importantes modifications, la vitesse augmentée d'ouverture de fissures n'ait pas été prise en considération.
- Parmi les simples essais de praticabilité seulement 2 de 8 systèmes ont réussi sans restrictions; pour 4 systèmes une praticabilité directe est seulement possible sous des conditions limite.
- En considérant la résistance au choc de toutes les structures il faut douter de la "praticabilité " générale des systèmes sous une sollicitation directe.
- Ceci est également valable pour la résistance au glissement sous des intempéries générales.

Une praticabilité directe des systèmes admis jusqu'à présent est seulement possible sous des conditions de limite qui seulement peuvent être maintenues et contrôlées pour des étagères surélevées automatisées sans connexion directe à des voies de communication. Mais même sous de telles conditions limite idéales il faut tenir compte du fait qu'une praticabilité directe et restreinte est en contradiction à une capacité suffisante de franchissement de fissures.

T 2391

Sealing of catching devices practicable for the crossing by persons and vehicles

For an interpretation near to practice of the term "practicability for the crossing by persons and vehicles" it has to be taken into consideration in view and especially because of water protection systems that such extensions of use necessarily cause stresses which are not covered by practicability in the proper meaning. Taking into account the special qualities of material and structures in order to describe a general suitability for traffic based upon the safety aspects, the criteria "impact strength" and "skid resistance" have been involved into the investigations. Even the other criteria - especially the crack bridging tests - have been reviewed under the aspect of practicability of water protection systems.

The results may be summarized as follows:

- among 8 tested structures only 4 have passed the modified crack bridging test, although one of the most important modifications, the increased crack opening velocity, has not been taken into account.
- As for the simple practicability tests only 2 among 8 systems have succeeded; for 4 further structures a direct practicability is only possible under limited boundary conditions.
- Considering the impact strength of all structures the general "practicability by traffic" of the systems under direct stressing has to be called into question.
- The same is valid for the skid resistance under general weather conditions.

A direct practicability by traffic of the admitted structures therefore may only be possible under boundary conditions, which may only be maintained and controlled for automatized high-level shelves without connection to other traffic ways. But even under such "ideal" boundary conditions it has to be taken into account that a limited, direct practicability stands in contradiction to a sufficient crack bridging capacity.