

URETEK Deutschland GmbH
Wilhelmshavener-Straße 35
26180 Rastede

**Prüfung, Überwachung, Zertifizierung,
Beratung, Forschung, Begutachtung**

Asphalt, Beton, Bitumen, hydraulische Bindemittel, Gesteinskörnungen, RC-Baustoffe, industrielle Nebenprodukte, Bauschutt, Böden

RAP-Strat-Anerkennungen:

	A	B	C	D	G	H	I
0				D0			
1	A1	-	-		G1	H1	I1
2		-	-		G2		I2
3	A3	B3	-	D3	G3	H3	I3
4	A4	B4	-	D4	G4	H4	I4

Betonprüfstelle (VMPA-B-2001)

Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Beton nach BayBO (Kennziffer BAY14)

Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Gesteinskörnungen und Asphalt gemäß BauPG (Kenn-Nr. 1280)

Mitglied im Bundesverband unabhängiger Institute für bautechnische Prüfungen e.V.

23.04.2007 DMS

Prüfbericht Nr. 7037-B1-A

Ermittlung der Produkteigenschaften von URETEK- Expansionsharzproben Dynamische Druckschwellversuche

1. Problemstellung und Auftrag

Am 31.01.2007 erhielt das Institut Dr.-Ing. Gauer Proben aus Expansionsharz von der Fa. URETEK Deutschland GmbH, Niederlassung Nord. Es handelte sich um plattenförmige Elemente aus Expansionsharz, die im Labor der Fa. URETEK mit verschiedenen definierten Raumdichten hergestellt wurden.

An den Expansionsharzproben sollen orientierende Untersuchungen zu Ermittlung der vorhandenen Materialkennwerte durchgeführt werden. Ziel war die Abschätzung des Kriechverhaltens unter wiederholter dynamischer Lasteinwirkung.

2. Beschreibung der Probestücke und der Untersuchungen

Von der Fa. URETEK wurden sechs Probestücke übersandt. Es handelte sich um drei zylindrische Probestücke mit einem Durchmesser von 48 mm und drei Probestücke mit einem Durchmesser von 97 mm jeweils mit drei unterschiedlichen Dichten. Alle Probestücke waren 19 bis 20 mm dick. Augenscheinlich wurden die Probestücke aus größeren Blöcken durch fräsen und drehen hergestellt.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Probestücke.

Tabelle 1: Probestücke aus URETEK – Expansionsharz

Probe Nr.		01	02	03	04	05	06
Durchmesser	mm	48	48	48	97	97	97
Angegebene Raumdichte	kg/m ³	100	200	300	100	200	300

An den Probestücken wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der Kraft-Verformungslinie (Drucksetzungsversuche)
- Untersuchung des Kraft-Verformungsverhalten (Kriechkurve) mit dem dynamischen Druckschwellversuch in Luft
- Untersuchung des Kraft-Verformungsverhalten (Kriechkurve) mit dem dynamischen Druckschwellversuch in Wasser

3. Untersuchungsergebnisse der Drucksetzungsversuche

Die Untersuchungsergebnisse sind in den folgenden Tabellen und grafischen Darstellungen zusammengefasst.

An drei verschiedenen Probekörpern mit unterschiedlichen Dichten wurde zunächst das Kraft-Verformungsverhalten bei einmaliger Belastung bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 1, 2 und 3 dargestellt.

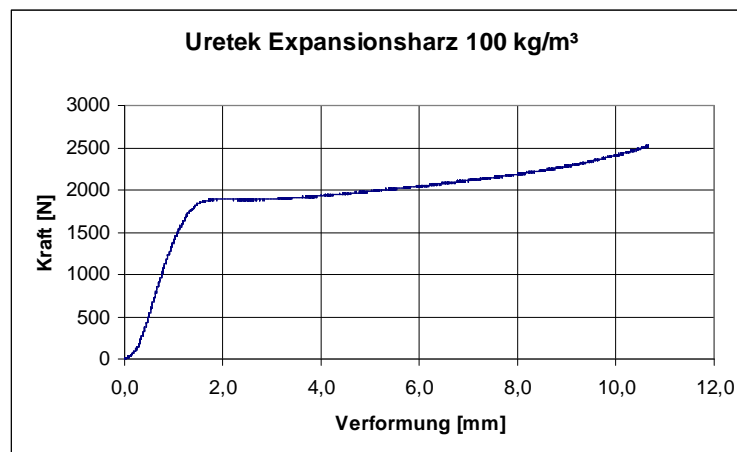


Abb. 1: Belastungsversuch an der Probe mit der angegebenen Dichte 100 kg/m³; nach einer kurzen Konsolidierungsphase folgt ein annähernd linear-elastischer Bereich, der zwischen 1600 und 1800 N in den Fließbereich übergeht

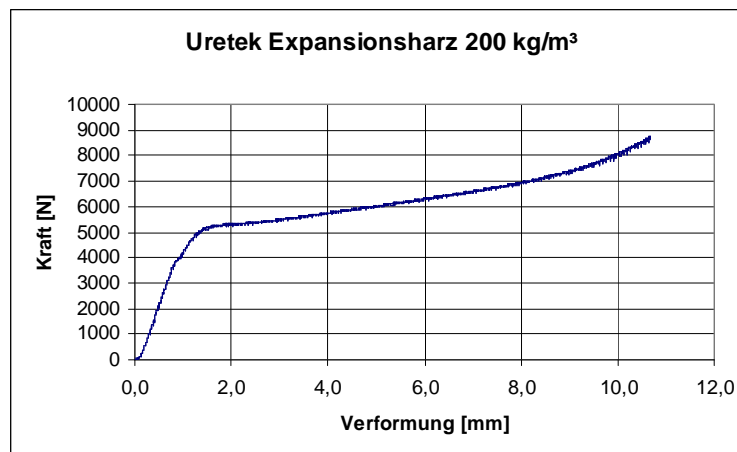


Abb. 2: Belastungsversuch an der Probe mit der angegebenen Dichte 200 kg/m^3 ; nach einer kurzen Konsolidierungsphase folgt ein annähernd linear-elastischer Bereich, der zwischen 5.000 und 5.500 N in den Fließbereich übergeht

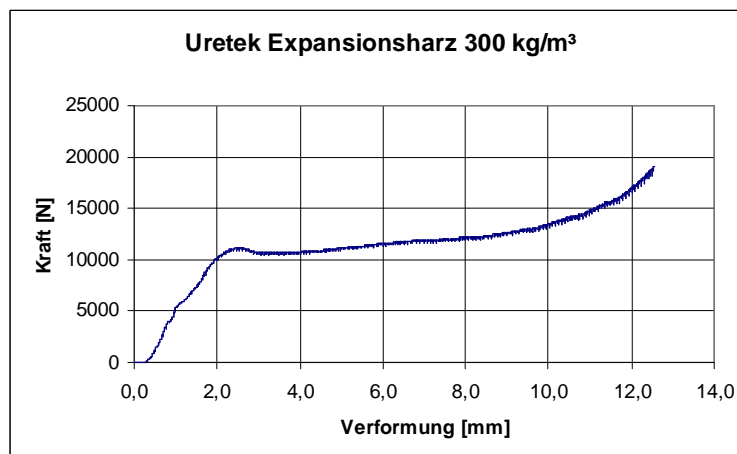


Abb. 3: Belastungsversuch an der Probe mit der angegebenen Dichte 300 kg/m^3 ; nach einer kurzen Konsolidierungsphase folgt ein annähernd linear-elastischer Bereich, der zwischen 10.000 und 11.000 N in den Fließbereich übergeht

Die Kraft-Verformungs-Linien zeigen, dass die im linear elastischen Bereich ertragbare Spannung von der Dichte abhängig ist. Für die dynamischen Druckschwellversuche sollte eine Belastungshöhe gewählt werden, die innerhalb des linear-elastischen Bereiches liegt.

Aus den Kraft-Verformungslinien lässt sich die jeweils maximal ertragbare Spannung und die dabei erreichte Dehnung (Stauchung) abschätzen. Die maximal ertragbare Spannung wird definiert als die Spannung, bei der die Kraft-Verformungslinie vom (annähernd) linearen Verlauf abweicht. Aus der Steigung der linearen Spannungs-Dehnungslinie lassen sich die Elastizitätsmoduli ableiten.

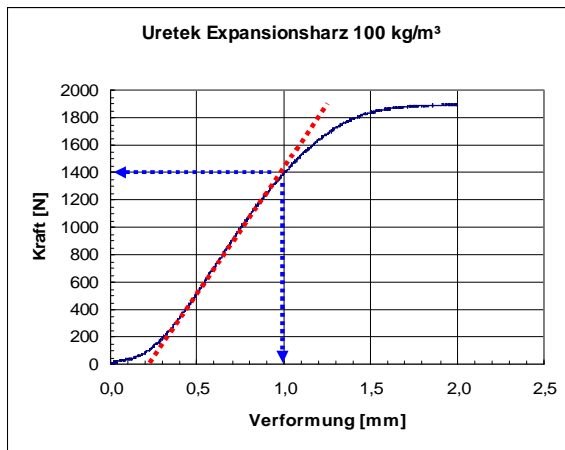


Abb. 4: Belastungsversuch an der Probe mit der angegebenen Dichte von 100 kg/m^3 ; Ende des elastischen Bereiches bei einer Kraft von 1.400 N und einer Verformung von 1 mm

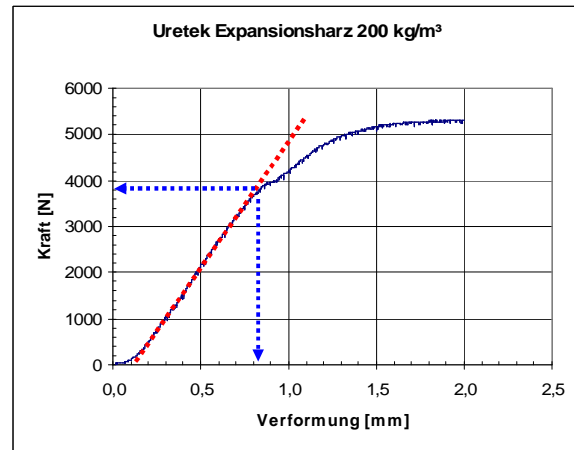


Abb. 5: Belastungsversuch an der Probe mit der angegebenen Dichte von 200 kg/m^3 ; Ende des elastischen Bereiches bei einer Kraft von 3.900 N und einer Verformung von $0,8 \text{ mm}$

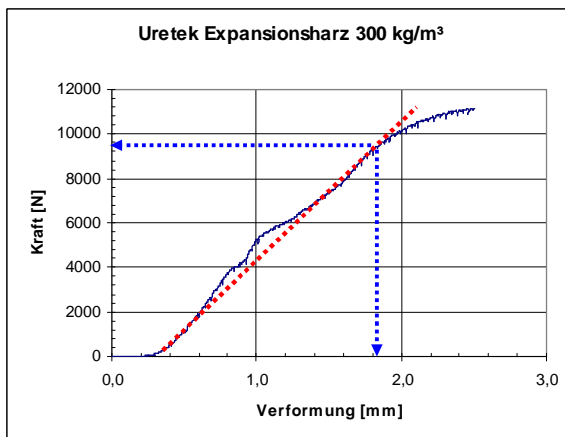


Abb. 6: Belastungsversuch an der Probe mit der angegebenen Dichte von 300 kg/m^3 ; Ende des elastischen Bereiches bei einer Kraft von 9.500 N und einer Verformung von $1,8 \text{ mm}$

]

Aus den Abbildungen 4 bis 6 ergeben sich die in Tabelle 2 zusammengefassten maximal ertragbaren Spannungen und Dehnungen sowie die aus den Steigungen der Spannungs-Dehnungslinien errechneten Elastizitätsmoduli.

Tabelle. 2: Maximal ertragbare Spannungen, Verformungen und Elastizitätsmoduli in Abhängigkeit von der Dichte der Uretek-Expansionsharzproben

Dichte	kg/m ³	100	200	300
Maximal ertragbare Spannung	N/mm ²	0,77	2,2	5,3
bei Dehnung	‰	50	40	90
Elastizitätsmodul	N/mm ²	15,4	55,0	58,9

4. Festlegungen der Randbedingungen für den Dynamischen Druckschwellversuch

Aus der bekannten Beanspruchung von Fahrbahndecken lassen sich die in der Praxis auftretenden Spannungen abschätzen. In Deutschland beträgt das maximal zulässige Achsgewicht 11 Tonnen. Die daraus resultierende Radlast ergibt bei der idealisierten Annahme einer kreisrunden Reifenauflandfläche mit einem Durchmesser von 30 cm eine Reifenkontaktspannung von 0,78 N/mm². Für Dimensionierungsberechnungen ist es üblich, diese Spannung noch mit einem Faktor zu multiplizieren, um die in der Praxis häufig vorhandenen infolge Überladung erhöhten Radlasten und die dynamische Radlasthöhung infolge von Unebenheiten (z.B. Höhenversätze am Übergang von einer Betonplatte auf die andere) zu berücksichtigen. Eine übliche Größe des „Sicherheitsbeiwertes“ ist 1,2; damit ergibt sich eine rechnerische Reifenkontaktspannung von $(0,78 \times 1,4 =) 0,94 \text{ N/mm}^2$.

Die vorhandenen Berechnungsmodelle, z. B. das Näherungsverfahren nach Eisenmann zur Berechnung der Biegezugspannungen in einem Dreischichtensystem, erlauben nicht die Berücksichtigung einer „weichen“, nur wenige Millimeter dünnen Expansionsharzschicht zwischen einer Betonplatte und einer HGT. Deshalb sollen folgende ingenieurmäßige Überlegungen zur Auswirkung von elastischen Zwischenschichten angestellt werden.

Ähnlich wie bei geschäumten Dämmmaterialien im Hochbau ist die Tragfähigkeit dieser Schichten abhängig von der Lastverteilung. Punktförmige Lastkonzentrationen führen zur Überschreitung der Festigkeitsgrenze und zur Zerstörung, während die Verteilung der Last auf eine große Fläche zu einer hohen Tragfähigkeit führt. Dies ist zurückzuführen auf die Verringerung der Spannung durch Vergrößerung der Auflagerfläche und auf die behinderte Querdehnung durch die Einspannung der „weichen“ Zwischenschicht.

Im Regelfall werden die Expansionsharze eingesetzt, um Hohlräume unter den Betonplatten zu füllen und dabei einen kraftschlüssigen Verbund zwischen der Unterseite der Betonplatte und dem erodierten Untergrund (wieder-) herzustellen. Nachdem die Erosion in der Regel am hochbeanspruchten Plattenrand am größten ist, finden sich hier oft die Hohlräume. Dies bedeutet, dass die Betonplatte am Rand nicht aufliegt, aus statischer Sicht somit ein „Kragarm“ mit entsprechend hoher Biegebeanspruchung bei der Belastung durch Verkehr vorliegt.

Das kraftschlüssige Verfüllen des Hohlraumes mit Expansionsharz stellt den ursprünglichen Zustand des Kontaktes zwischen Unterseite der Betonplatte und plattenunterliegender Schicht (HGT oder ungebundene Schottertragschicht) wieder her.

Im Idealfall finden sich nach der Expansionsharzverfüllung deshalb analoge Auflagerbedingungen wieder, wie vor der Hohlraumbildung durch Erosion, d. h. die Auflagerbedingungen werden erheblich verbessert.

Das diese Verbesserung trotz der Anwendung eines vergleichsweise „weichen“ Materials tatsächlich eintritt, lässt sich in der Praxis durch Messungen der Tragfähigkeit mit dem FWD vor und nach der Verfüllung bzw. der Festlegung von Betonplatten mit Expansionsharz nachweisen. So haben die Messungen gezeigt, dass sich die Einsenkungen am ursprünglich hohl liegenden Plattenrändern nach der Anwendung von Expansionsharz wieder im Bereich der üblichen Größenordnung befinden.

Für eine Radlast von 5 Tonnen und einer Dicke der Betonplatte von 200 mm (E-Modul = 30.000 N/mm²) liegt der rechnerisch ermittelte Einsenkungswert nach Eisenmann/Leykauf bei rund 0,4 mm. In der Praxis wurden an verschiedenen Autobahnabschnitten, z. B. auf der BAB A 7 bei Seesen Einsenkungen am Plattenrand von maximal 0,3 mm nach der Expansionsharzeinbringung gemessen. Dies bedeutet, dass die **Auflagerbedingungen mit Expansionsharz mit den Auflagerbedingungen im Neuzustand ohne Expansionsharz vergleichbar** sind.

Für die Berechnungen der Spannungen und Verformungen kann deshalb ein Bettungsmodul k in der gleichen Größenordnung angesetzt werden, wie er bei Systemen Beton/HGT oder Beton/Schottertragschicht angenommen wird. Bei Werten von $k \geq 0,1$ geht man von guten Auflagerbedingungen aus.

Mit diesem Bettungsmodul wurden die Berechnungen mit dem Programm SLAB von van Cauwelaert durchgeführt. Die Berechnungen wurden durchgeführt für die normale Beanspruchung mit einem 5,5-Tonnen-Rad und für die mit dem Sicherheitsfaktor 1,2 erhöhte Last. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt.

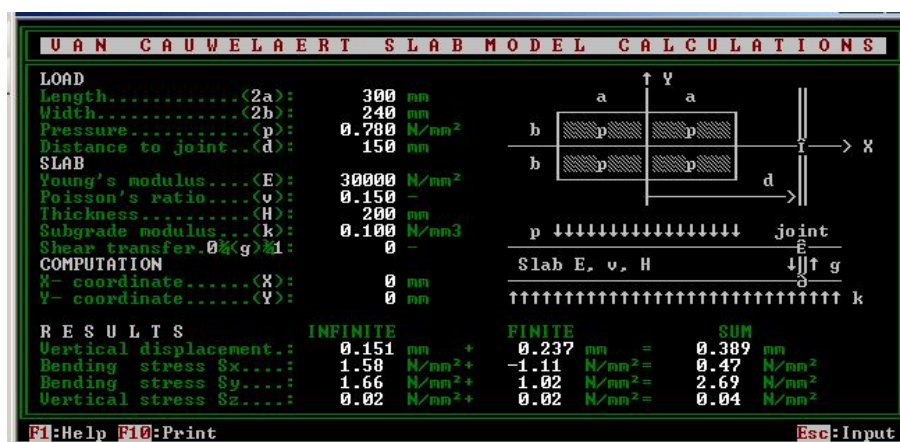


Abb. 7: Spannungen und Verformung bei Belastung einer 20 cm dicken Betonplatte auf Expansionsharz mit einem Bettungsmodul von $k = 0,1$ und einer Radlast von 5,5 Tonnen



Abb. 8: Spannungen und Verformung bei Belastung einer 20 cm dicken Betonplatte auf Expansionsharz mit einem Bettungsmodul von $k = 0,1$ und einer Radlast von $(5,5 \times 1,2 =) 6,6$ Tonnen

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Beanspruchungen einer Betonplatte größer werden, je höher die Radlast ist. Dies drückt sich u. a. aus durch die Biegezugbeanspruchung (S_y) und die Einsenkungen am Plattenrand (vertical displacement).

Die berechneten Einsenkungen liegen bei einem 5,5-Tonnen-Rad bei 0,39 mm und bei einem durch dynamische Einflüsse erhöhten Radlast bei 0,47 mm. Werte in dieser Größenordnung werden auch mit dem Falling Weight Deflectometer an Plattenrändern bestimmt.

Für Versuche, mit denen das Verhalten von Expansionsharz unter wiederholter Belastung zeitraffend im Laboratorium geprüft werden soll, sollte eine Belastung gewählt werden, bei der in einer versuchtechnisch ökonomischen Zeitspanne ein Ergebnis zu erwarten ist. Aus den vorstehenden Überlegungen geht hervor, dass an den Plattenrändern Einsenkungen von rund 0,4 bis 0,5 mm zu erwarten sind. Dies würde nach den Druckversuchen gem. Abbildungen 4, 5 und 6 zu Spannungen im Expansionsharz von 0,28 bis ca. 1,0 N/mm² führen.

Für die Dynamischen Druckschwellversuche wurden deshalb drei Oberspannungen ausgewählt: 0,5, 0,7 und 0,9 N/mm². Für das Expansionsharz mit einer Dichte von 100 kg/m³ liegen die beiden oberen Spannungen bereits im Grenzbereich des elastischen Verhaltens (Vergleiche Abbildung 4). Bei der Variante mit der Dichte von 200 kg/m³ liegt die Beanspruchung etwa in der Mitte des linearelastischen Bereich: Bei der Varianten mit der Dichte von 300 kg/m³ liegt die Beanspruchung etwa im unteren Drittel des elastischen Bereiches.

Zur Simulation einer wiederholten Überrollung mit mehrachsigen, schweren Fahrzeugen erfolgt die Ermittlung der Kriechkurven in dynamischen Druckschwellversuchen an Expansionsharzproben mit verschiedenen Dichten. Für die Belastung wurde eine Impulsbelastung nach DIN EN 12697, Teil 25 „Dynamischer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme“ angesetzt. Gemäß Abbildung 11 erfolgt nach einem sinusförmigen Belastungsimpuls von 0,2 Sekunden Dauer eine Lastpause von 1,2 Sekunden. Als Ober-

spannung wurden angesetzt 0,5, 0,7 und 0,9 N/mm². Die Unterspannung wurde konstant zu 0,1 N/mm² gewählt. Alle Versuche wurden bei 20 °C durchgeführt.

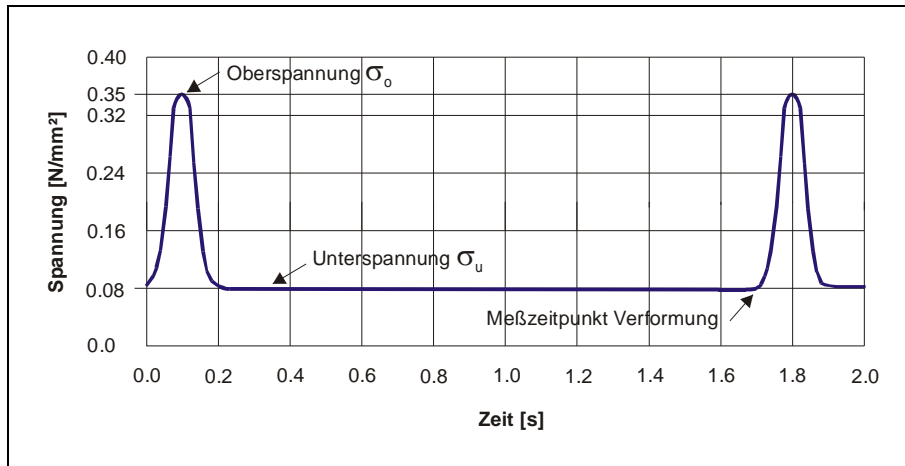


Abb. 9: Belastungsimpuls für Druckschwellversuche gemäß DIN EN 12697, Teil 25, eine Impuls und einer Lastpause entsprechen einem Zyklus

Grundlage der Auswertung bildet die ermittelte Verformung in Abhängigkeit von der Belastungszahl, sogenannte Druck-Kriechkurven. Sofern nicht andere Abbruchkriterien zu einem früheren Versuchsende führen, werden die Versuche mit 20.000 Lastwechseln (Zyklen) durchgeführt.

Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

Tabelle. 3: An Expansionsharzproben durchgeführte dynamische Druckschwellversuche

	Dichte	kg/m ³	100	200
Temperiermedium	Luft	N/mm ²	0,5	0,5
	Luft	N/mm ²	0,7	-
	Luft	N/mm ²	0,9	-
	Wasser	N/mm ²	0,5	-
	Wasser	N/mm ²	0,9	-

Die resultierenden Impulskriechkurven sind in den Abbildungen 10 bis 15 dargestellt.

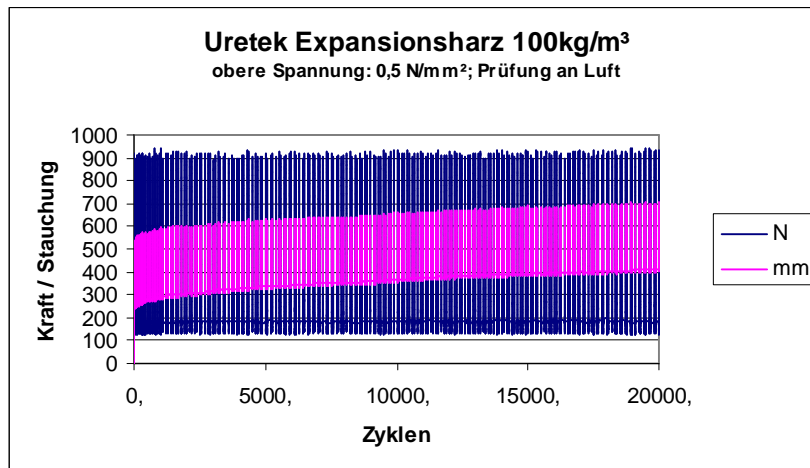


Abb. 10: Impulskriechkurve von Expansionsharz mit einer Dichte von 100 kg/m³,
 Oberspannung 0,5 N/mm², Temperiermedium Luft

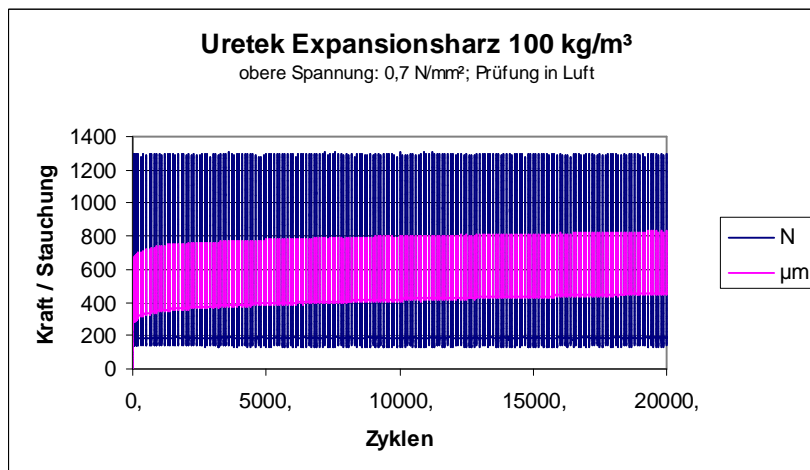


Abb. 11: Impulskriechkurve von Expansionsharz mit einer Dichte von 100 kg/m³,
 Oberspannung 0,7 N/mm², Temperiermedium Luft

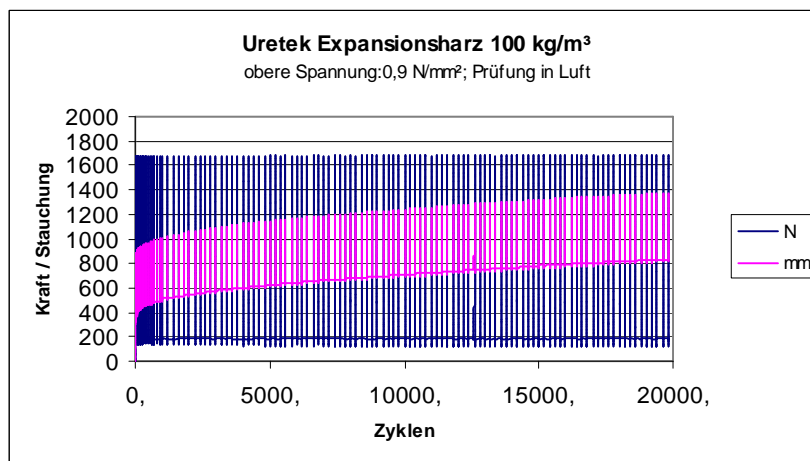


Abb. 12: Impulskriechkurve von Expansionsharz mit einer Dichte von 100 kg/m³,
 Oberspannung 0,9 N/mm², Temperiermedium Luft

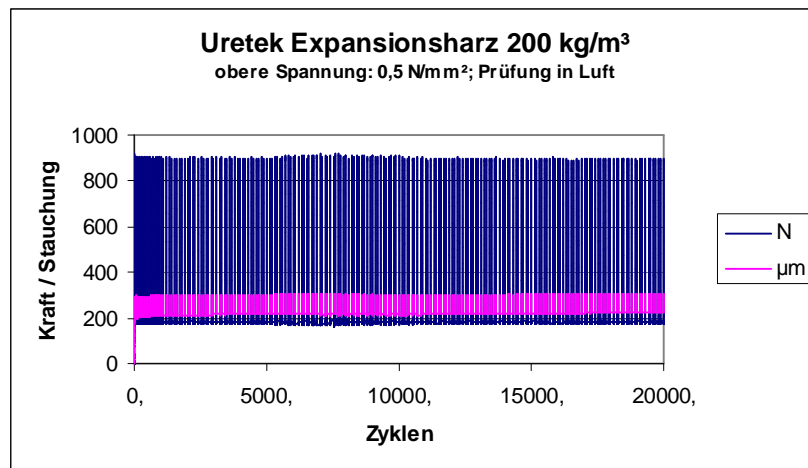


Abb. 13: Impulskriechkurve von Expansionsharz mit einer Dichte von 200 kg/m³,
Oberspannung 0,5 N/mm², Temperiermedium Luft

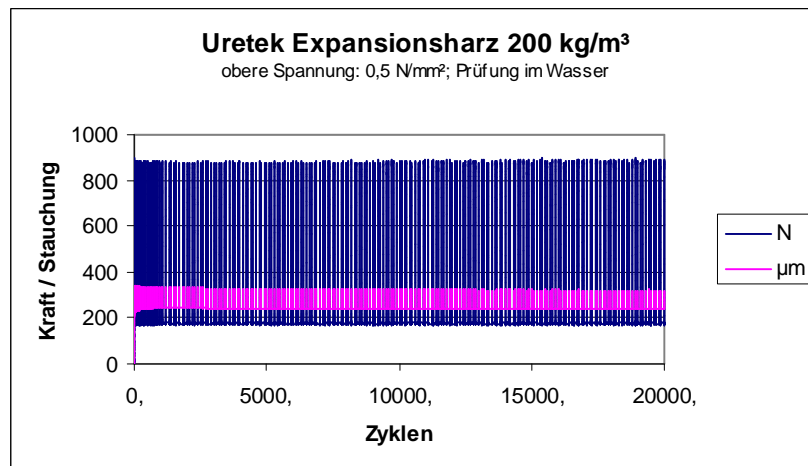


Abb. 14: Impulskriechkurve von Expansionsharz mit einer Dichte von 100 kg/m³,
Oberspannung 0,5 N/mm², Temperiermedium Wasser

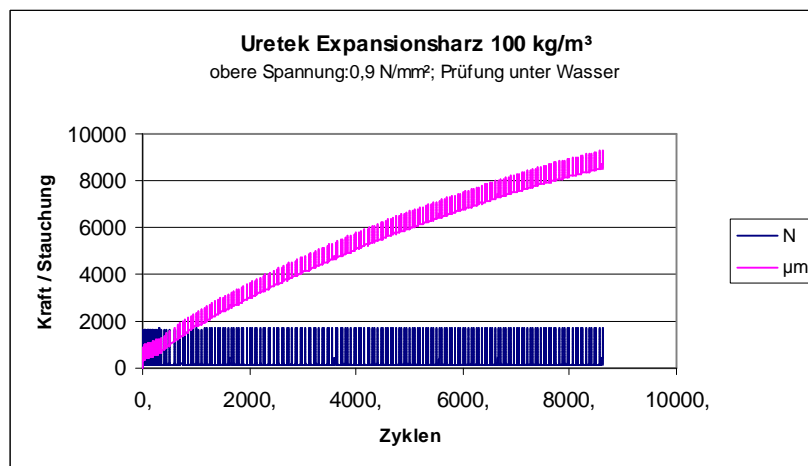


Abb. 15: Impulskriechkurve von Expansionsharz mit einer Dichte von 100 kg/m³,
Oberspannung 0,9 N/mm², Temperiermedium Wasser

5.1 Auswertung und Interpretation

Die resultierende Gesamtverformung nach 20.000 Lastzyklen ist abhängig davon, in welchem Bereich die Oberlast angesetzt wird.

Bei den Expansionsharzproben mit 100 kg/m^3 entsteht bei $0,5 \text{ N/mm}^2$ und $0,7 \text{ N/mm}^2$ eine Gesamtverformung nach 20.000 Lastwechseln von rund $0,4 \text{ mm}$ (Abbildungen 10 und 11), wobei der Großteil der Verformung ($0,2$ bzw. $0,3 \text{ mm}$) auf die Konsolidierung bei Versuchsbeginn zurückzuführen ist. Die weitere Kriechverformung beträgt demnach nur ca. $0,2$ bzw. $0,1 \text{ mm}$.

Unter Berücksichtigung der Tatsachen, dass

- in der Praxis keine derartige (Anfangs-) Konsolidierungen auftreten, da das Expansionsharz unter Druck eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Schichten herstellt,
- in der Praxis eine behinderte Seitendehnung anzusetzen ist und
- die Dichten des Expansionsharzes in der Regel weit über 100 kg/m^3 liegen.

kann aus dem Versuchergebnis gefolgert werden, dass unter normalen Verkehrslasten praktisch keine Kriechverformungen einer Expansionsharzinjektion zu erwarten sind.

Bei Spannungssteigerung auf $0,9 \text{ N/mm}^2$ steigt bei einer Dichte des Expansionsharzes von 100 kg/m^3 die Endverformung auf $0,7 \text{ mm}$ (Abbildung 12), wobei etwa $0,4 \text{ mm}$ der anfänglichen Konsolidierung zugeordnet werden können. Bei dieser hohen Belastung reagiert das Material mit der geringen Dichte nicht mehr rein-elastisch. Wie aus den Druckversuchen (Abbildung 4) ersichtlich, wird über $0,77 \text{ N/mm}^2$ schon ein Anteil einer bleibenden Verformung aktiviert. Für die Praxis bedeutet dies, dass auch bei wiederholten, sehr hohen Lasten nur Kriechverformungen in $1/10 \text{ mm}$ -Bereich auftreten. Diese Interpretation gilt jedoch nur für Expansionsharzinjektionen mit geringen Dichten.

Bei dem Expansionsharz mit höherer Dichte (200 kg/m^3) führt der dynamische Druckschwellversuch nach 20.000 Lastwechseln zu einer resultierenden Gesamtverformung von $0,2 \text{ mm}$ (Abbildung 13), wobei der Großteil der Verformung durch die anfängliche Konsolidierung verursacht wird. Die eigentliche Kriechverformung geht praktisch gegen Null. Expansionsharz mit dieser Dichte zeigt im Laborversuch erst bei Spannungen über $2,2 \text{ N/mm}^2$ nennenswerte nicht-reversible Verformungsanteile.

Aus den Versuchsergebnissen kann gefolgert werden, dass in der Praxis auch unter erhöhten Verkehrslasten keine Kriechverformungen einer Expansionsharzinjektion zu erwarten sind, wenn die Dichte des Expansionsharze über 200 kg/m^3 liegt.

Aufgrund dieses Versuchsergebnisses wurden keine Versuche mit dem noch höher belastbaren Expansionsharz mit 300 kg/m^3 durchgeführt.

Von entscheidender Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von Expansionsharz im Straßenbau sind die Eigenschaften des Materials unter dynamischer Belastung bei Wassereinwirkung. Deshalb wurde orientierend dynamische Druckschwellversuche mit dem Expansionsharz mit 100 kg/m^3 unter Wasser durchgeführt (Abbildung 14 und 15).

Die Impulskriechkurve in Abbildung 14 zeigt praktisch das gleiche Bild wie die Impulskriechkurve des vergleichbaren Materials in Luft (Abbildungen 10 und 13). Wegen der geschlossenzelligen Struktur des aufgeschäumten Expansionsharzes kann kein Wasser in die innen liegenden Hohlräume eindringen. Entsprechend niedrig ist die im Labor bestimmte Wasseraufnahme von ca. 2,5 Vol.-%.

Die Verhältnisse ändern sich, wenn der Druckschwellversuch mit einer Oberspannung im Bereich der Druckfestigkeit des Expansionsharzes mit der geringsten Dichte durchgeführt wird. Wie in Abbildung 15 dargestellt, führt diese Belastung zu einer erhöhten Kriechverformung, die auf eine Zerstörung des Expansionsharzgefüges durch die Entstehung hydraulischer Drücke zurückzuführen ist. Die nach dem Versuch bestimmte Wasseraufnahme betrug rund 13 Vol.-%.

6. Zusammenfassung und Empfehlung

An im Labor hergestellten Expansionsharzproben mit definierten Dichten wurden dynamische Druckschwellversuche durchgeführt. Angewendet wurde ein aus dem im Straßenbau üblichen Normenwerk abgeleitete Impulsbelastungsfunktion. Die Oberlasten wurde im Rahmen theoretischer Überlegungen gewählt und mit Ergebnissen aus FWD-Messungen begründet. Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung wurden auch Versuche im „Überlastbereich“ an Expansionsharzen mit geringer Dichte durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen war die Abschätzung des Verhaltes unter wiederholter dynamischer Belastung. Die Ergebnisse zeigen in der Tendenz, dass Expansionsharzschichten unter Betonplatten unter normaler Verkehrsbelastung keine nennenswerten Kriechverformungen erwarten lassen. Erste orientierende Versuche lassen auch die dynamische Belastung des Expansionsharzes unter Wasser als unkritisch erscheinen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Versuche muss berücksichtigt werden, dass die Versuchsbedingungen im Labor gegenüber der Praxis eine wesentliche Verschärfung darstellen, insbesondere wegen der im Druckschwellversuch nicht behinderten Seitendehnung.

Die Laborergebnisse bestätigen die Ergebnisse vom Messungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer, wonach mit Expansionsharz unterpresste Betonplatten auf der BAB A7 auch nach zwei Jahren unter Verkehr keine wesentlichen Veränderung des Tragverhaltens zeigen.

Abschließend soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Laborversuche wegen der geringen Zahl der durchgeführten Untersuchungen nur orientierenden Charakter haben können.

Es wird empfohlen, weitere Versuche zur Absicherung der ersten Ergebnisse durchzuführen. Die Ergebnisse der Laborversuche sind durch Untersuchungen in der Praxis, z. B. Materialentnahme mit Bohrkernen, Falling-Weight-Deflectometer- und Impulsradarmessungen zu ergänzen und zu verifizieren.

INSTITUT DR.-ING. GAUER
Ingenieurgesellschaft mbH



Dr.-Ing. M. Schmalz