

Adhäsion von Bitumen am Gestein (Haftverhalten) – Verfahren der quantitativen Bestimmung auf Grundlage der Europäischen Normung

FA 7.209

Forschungsstelle: Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. habil. P. Renken)

Bearbeiter: Renken, P. / Wistuba, M. P. / Grönniger, J. / Schindler, K.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juli 2009

1 Aufgabenstellung

Zur Beurteilung der Adhäsionseigenschaften (Haftverhalten) von Straßenbauasphalten sind eine Reihe von Prüfverfahren bekannt, darunter Versuche an unverdichteten bitumen-umhüllten Gesteinskörnern und an verdichteten Mischgutproben. In die Europäische Normung wurden mit der DIN EN 12697-11 (Dezember 2005) drei Prüfverfahren zur Bestimmung der Affinität zwischen Gesteinskörnungen und Bitumen aufgenommen: **Rolling-Bottle-Test, statische Wasserlagerung, Ablösung im siedenden Wasser**. Des Weiteren ist mit der DIN EN 12697-12 ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen am verdichteten Mischgut genormt (**Änderung der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung**).

Ziel dieses Forschungsprojekts ist die Prüfung auf Anwendbarkeit und Eignung der oben angeführten "europäischen" Prüfverfahren auf in Deutschland üblicherweise eingesetzte Bitumen-Gesteins-Gemische sowie ein sinnvoller Vorschlag für die Einengung der in der jeweiligen Norm enthaltenen

Wahlmöglichkeiten. Dazu werden in diesem Projekt die Prüfverfahren gemäß Europäischer Normung an ausgewählten Bitumen-Gestein-Kombinationen durchgeführt.

Zusätzlich werden – als Alternative zu den in der Europäischen Normung vorgeschlagenen Prüfverfahren – an den im Rahmen dieses Projekts ausgewählten Bitumen-Gestein-Kombinationen der **zentrische Zugversuch am verdichteten Mischgut** und die **Randwinkelmessung** zwischen dem Gesteinskorn und einem Bitumentropfen (Bitumen-Tri-Gemisch) unter Wasser untersucht.

Mit den neu gewonnenen Erkenntnissen sollen Technische Prüfvorschriften erstellt bzw. modifiziert, ein Bewertungshintergrund geschaffen und gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge für die 2. Generation der Europäischen Normung entwickelt werden.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Überblick Untersuchungsprogramm

Bild 1 zeigt das Untersuchungsprogramm im Überblick. Dabei werden unterschieden: Prüfungen an den Einzelkomponenten (Bitumen-Prüfungen, Gesteins-Prüfungen), Prüfung von Hafteigenschaften am Einzelkorn (Rolling-Bottle-Test, statische Wasserlagerung, Ablösung im siedenden Wasser, Randwinkelmessung) und Prüfung von Hafteigenschaften an im Labor gemischten und verdichteten Asphalt-Probekörpern (Spaltzugversuch und zentrischer Zugversuch vor und nach Wasserlagerung).

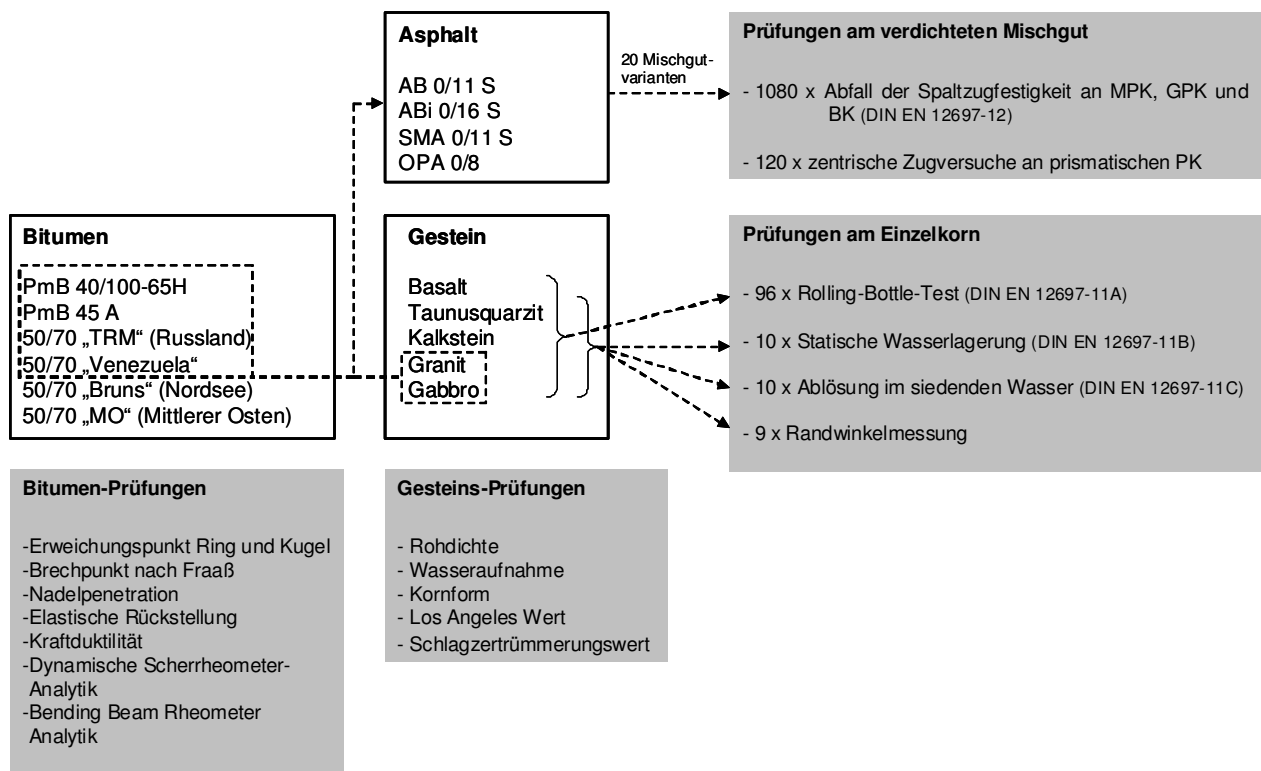


Bild 1: Überblick Untersuchungsprogramm

2.2 Auswahl der Baustoffe und Prüfverfahren zur Charakterisierung der Baustoffeigenschaften

Die Untersuchungen im Rahmen des Projekts erfolgen an folgenden fünf Gesteinsarten, deren Haftverhalten von haftunkritisch bis haftkritisch eingestuft werden kann:

- Granit (haftkritisch)
- Taunusquarzit (haftkritisch)
- Gabbro (haftunkritisch)
- Basalt (haftunkritisch)
- Kalkstein (haftunkritisch)

Zur Charakterisierung der Gesteinseigenschaften werden an den fünf ausgewählten Gesteinen konventionelle Prüfverfahren zur Bestimmung folgender Kennwerte eingesetzt:

- Rohdichte nach DIN EN 1097-6,
- Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6,
- Kornform DIN EN 933-4,
- Los Angeles Wert nach DIN EN 1097-2 und
- Schlagzertrümmerungswert nach DIN EN 1097-2 (an der TU München durchgeführt).

Es werden fünf verschiedene Bitumenarten bzw. -sorten untersucht, von zwei unterschiedlichen Herstellern:

- polymermodifiziertes Bitumen PmB 45 A,
- hochpolymermodifiziertes Bitumen PmB 40/100-65H,
- Straßenbaubitumen 50/70 "Bruns" aus der Provenienz Nordsee,
- Straßenbaubitumen 50/70 "TRM" aus der Provenienz Russland,
- Straßenbaubitumen 50/70 "Venezuela" aus der Provenienz Venezuela,
- Straßenbaubitumen 50/70 "MO" aus der Provenienz Mittlerer Osten.

An den ausgewählten Bitumenarten bzw. -sorten werden folgende konventionelle und rheologische Bindemittleigenschaften untersucht:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel (EwP RuK) gemäß DIN EN 1427,
- Brechpunkt nach Fraaß (BP) gemäß DIN EN 12593,
- Nadelpenetration (Pen) gemäß DIN EN 1426,
- Elastische Rückstellung (el-R) gemäß DIN EN 13398,
- Kraftduktilität (KD) gemäß DIN EN 13703,
- Dynamische Scherrheometer-Analytik (DSR) gemäß DIN EN 14770,
- Bending-Beam-Rheometer-Analytik (BBR) gemäß DIN EN 14771.

2.3 Prüfverfahren zur Ansprache der Adhäsion von Bitumen zum Einzelkorn

Zur Ansprache des Haftverhaltens zwischen Bitumen und Gestein kommen im Rahmen des Projekts folgende Prüfungen am Einzelkorn zum Einsatz:

Rolling-Bottle-Test: Die Bewertung der Gestein-Bitumen-Adhäsion durch den Rolling-Bottle-Test (RBT) gemäß DIN EN 12697-11A erfolgt durch die visuelle Beurteilung des mit Bitumen umhüllten Anteils der Einzelkörner nach mechanischer Rührbeanspruchung unter Wasser. Drei Teilproben von jeweils 150 g der bitumenumhüllten Einzelkörner werden dazu jeweils in eine 500 ml fassende Flasche mit 5 °C kaltem, destilliertem oder entionisiertem Wasser und mit einem fixierten Rührstab gefüllt. Die Flaschen werden mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 40 Umdrehungen pro Minute gedreht. Nach einer Dauer von 6 und 24 Stunden (die Rollzeit kann auf 48 und 72 Stunden ausgedehnt werden) werden die bitumenumhüllten Gesteinskörner in eine weiße Schale mit Wasser gegeben, um den verbleibenden Umhüllungsgrad visuell ermitteln zu können. Der Grad der Umhüllung der Gesteinskörner mit Bitumen ist durch Augenschein auf 5 % genau zu schätzen. Jede Schätzung muss während der gesamten Prüfung von zwei unabhängig voneinander arbeitenden Prüfern durchgeführt werden.

Statische Wasserlagerung: Bei der statischen Wasserlagerung (gemäß DIN EN 12697-11B) wird eine Schale mit 150 bitumenumhüllten losen Einzelkörnern bestückt, sodass diese einander nicht berühren. Anschließend ruht die Schale für den Zeitraum von einer Stunde. Dann wird die Probe vollständig mit destilliertem und auf 19 ± 1 °C temperiertem Wasser bedeckt. Die Temperatur wird für 48 Stunden konstant gehalten. Danach wird das Wasser abgegossen und die umhüllte Probe trocknet bei einer Temperatur von 19 ± 9 °C. Als Ergebnis des Verfahrens werden die Anzahl der nicht mehr vollständig umhüllten Körner gezählt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden an den ausgewählten Bitumen-Gestein-Kombinationen zusätzliche Prüfungen mit zur Norm abweichenden Versuchsbedingungen durchgeführt. Dabei wird die Prüftemperatur bis auf 40 °C erhöht und die Expositionsdauer auf bis zu 72 Stunden verlängert.

Ablösung im siedenden Wasser: Bei dem Verfahren der Ablösung im siedenden Wasser (gemäß DIN EN 12697-11C) werden die bitumenumhüllten Gesteinskörner einer mechanisch-dynamischen Beanspruchung ausgesetzt, indem sie 10 Minuten in entmineralisiertem, kochendem Wasser gelagert werden. Nach einer anschließenden Säureexposition wird das für die Neutralisation benötigte Säurevolumen durch Titration bestimmt. Mithilfe dieses Werts (und einer zuvor erstellten Kalibrierkurve) kann der Grad der Umhüllung quantifiziert werden.

Zur Erstellung der Kalibrierkurve werden zunächst sechs Proben à 200 g mit unterschiedlicher Anzahl von umhüllten und nicht umhüllten Gesteinskörnungen vorbereitet. Diese sechs Teilproben werden jeweils einem chemischen Angriff ausgesetzt. Nach Ablauf der vorgesehenen Einwirkdauer ist die Säure durch Abgießen der Lösung von den Gesteinskörnern zu trennen. Aus den sechs Teilproben werden unterschiedlich verbrauchte Säurevolumina (0,1 N HF bzw. 0,1 N HCl) ermittelt, die grafisch über den prozentualen Anteil an Gesteinskörnern ohne Bindemittel aufgetragen werden.

Randwinkelmessung: Beim Randwinkelmessverfahren (nicht in der Europäischen Norm enthalten) wird als Kennwert jener Winkel bestimmt, der sich unter Wasser zwischen einem auf einem Gesteinskorn aufgetragenen Bitumentropfen (Bitumen-Tri-Gemisch) und der Gesteinsoberfläche einstellt. Eine ungünstige Haftung liegt vor, wenn sich ein kugelförmiger Bitumentropfen bildet, der kaum Kontakt mit der Gesteinsunterlage aufnimmt. Weist das Tröpfchen eine Halbkugel auf, ergibt sich ein Kontaktwinkel von 90°. Dieser Wert wird in der Literatur (Schellenberger, 2004) als Grenze zwischen guter und schlechter Haftung bezeichnet. Als Ergebnis wird aus 10 Einzelmessungen ein Mittelwert gebildet.

2.4 Prüfungen am verdichteten Mischgut

2.4.1 Ausgewählte Mischgutarten und Mischgutvarianten

Folgende Mischgutarten werden (in Abstimmung mit dem Betreuungsausschuss) für die Prüfungen am verdichteten Mischgut (Spaltzug- und zentrische Zugversuche) festgelegt:

- Asphaltbeton 0/11 S (AC 11 D S)
- Splittmastixasphalt 0/11 S (SMA 11 S)
- Asphaltbinder 0/16 S (AC 16 B S)
- Offenporiger Asphalt 0/8 (PA 8)

Die Asphaltmischgute entsprechen den Spezifikationen der ZTV Asphalt-StB 01. Das Bindemittel wird je Mischgutart zweifach variiert, ebenso werden aus den fünf Gesteinsarten (auf Grundlage der Untersuchungen an den Baustoffkomponenten und der Prüfung der Adhäsion am Einzelkorn) zwei Gesteinsarten zur Asphaltmischgutherstellung ausgewählt: Granit (als haftkritisch einzustufen) und Gabbro (haftunkritisch). Die ausgewählten Gesteinsarten werden in der Splitt- und Brechsandfraktion variiert (Ausnahme: Offenporiger Asphalt). Um ausreichend hohe Hohlraumgehalte zu realisieren, wird ausschließlich Brechsand verwendet. Insgesamt ergeben sich dadurch 20 Mischgutvarianten für die Prüfungen am verdichteten Mischgut.

2.4.2 Herstellung der Asphaltgemische und -Probekörper

Zur Herstellung der Asphaltgemische, kommt der Gegenlaufzwangslabormischer (GZM-30+) zum Einsatz, wie er speziell zur Herstellung von Walzasphalt (auch mit Faserstoffen) und Gussasphalt entwickelt wurde. Das Mischprinzip beruht auf einem Gegenlaufzwangsmischbetrieb mit geneigter Mischtrommel und angestelltem Mischwerkzeug. Durch die Neigung der Mischtrommel und dem angestellten Mischwerkzeug ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung von Füller und Faserstoffen im gesamten Mischgut, die Gefahr von Entmischungen wird gleichzeitig minimiert.

Zur Herstellung der Asphalt-Probekörper werden folgende, sich voneinander grundlegend unterscheidende Verdichtungsverfahren eingesetzt: Marshall-Probekörper (MPK, Herstellung gem. TP A-30), Gyrator-Probekörper (GPK, Herstellung gem. DIN EN 12697-31) und aus Asphalt-Probepplatten (Herstellung gem. TP A-33) entnommene Bohrkern (BK) bzw. herausgesägte prismatische Probekörper.

2.4.3 Prüfverfahren zur Ansprache der Adhäsion von Bitumen zum Gestein im verdichteten Mischgut

Zur Ansprache des Haftverhaltens zwischen Bitumen und Gestein im verdichteten Asphaltmischgut kommen im Rahmen des Projekts folgende Prüfungen zum Einsatz:

Abfall der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung: Gemäß DIN EN 12697-12 werden mit dem statischen Spaltzugversuch die Dauerhaftigkeit und die Festigkeit von verdichtetem Asphalt vor und nach dem Zutritt von Wasser geprüft. Zur Bestimmung des Spaltzugfestigkeitsabfalls sind 6 Probekörper zu prüfen: drei trocken gelagerte Probekörper sowie drei weitere Probekörper, die vor der Spaltzugbeanspruchung einer Wassersättigung mit anschließender Wasserlagerung unterzogen wurden. Während des Versuchs wird der zwischen zwei Laststreifen fixierte Probekörper mit der Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min radial belastet und die maximal erreichte Last

beim Bruch des Probekörpers gemessen. Als Ergebnis der sechs pro Variante durchgeführten Spaltzugversuche (3 nass, 3 trocken) wird der Verhältniswert der indirekten Zugfestigkeiten ermittelt (Indirect Tensile Strength Ratio – ITSR-Wert als Quotient aus Spaltzugfestigkeit "nass" zu Spaltzugfestigkeit "trocken").

Um den Temperatureinfluss auf den Spaltzugfestigkeitsabfall der trockenen zu den nassen Probekörpern zu untersuchen, werden neben der normgemäßen Prüftemperatur von 15 °C zwei weitere Prüftemperaturen, nämlich 10 und 25 °C zusätzlich in das Prüfprogramm des Projekts aufgenommen.

Darüber hinaus wird die Spaltzugprüfung im Rahmen des Projekts sowohl an Marshall-Probekörpern, als auch an Gyrator-Probekörpern (verdichtet mit 50 Umdrehungen) und an Bohrkernen aus walzsektorverdichteten Asphalt-Probepplatten durchgeführt, um den Einfluss der verschiedenen Probekörperarten auf den Spaltzugfestigkeitsabfall zu untersuchen.

Zentrischer Zugversuch: Bei der Zugfestigkeitsprüfung (nicht in der Europäischen Norm enthalten) handelt es sich um den einaxialen zentrischen Zugversuch, der an jeweils 6 prismatischen Probekörpern (3 trocken, 3 nass) aus walzsektorverdichteten Asphalt-Probepplatten durchgeführt wird. Die zum Einbau in die Prüfmaschine benötigten Adapter werden mittels Zweikomponentenkleber an die Stirnflächen der Probekörper geklebt. Die Prismen werden der Zugprüfung bei einer Ziehgeschwindigkeit von 1,5 mm/min bis zum Versagen (Zugbruch) unterzogen. Die Prüftemperatur ist mit 15 °C festgelegt. Die Zugfestigkeit ermittelt sich aus der gemessenen Höchstkraft im Verhältnis zur Querschnittsfläche des Probekörpers. Der Verhältniswert der Zugfestigkeiten vor und nach Wasserlagerung ergibt sich aus dem Verhältnis der mittleren Zugfestigkeiten der nassen zur trockenen Gruppe.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Prüfung der Baustoffkomponenten

Die Ergebnisse der Prüfungen am Bitumen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Ergebnisse, die nicht im Bereich des entsprechenden Erfahrungswerts nach den TL PmB 01 liegen, sind grau hinterlegt.

Die Ergebnisse der Prüfungen am Gestein sind in Tabelle 2 zusammengefasst, wobei grau hinterlegte Werte jene Ergebnisse kennzeichnen, die nicht den Anforderungen gemäß TL Gestein-StB 04 genügen.

3.2 Prüfungen am Einzelkorn

Die Ergebnisse der Prüfungen am bitumenumhüllten Einzelkorn und der Randwinkelmessungen sind in Tabelle 3 vergleichend gegenübergestellt.

Zur besseren Übersicht sind die mit dem Rolling-Bottle-Test erzielten Ergebnisse in Bild 2 grafisch dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Prüfungen am Bitumen im Anlieferungszustand

Bindemittel Merkmal	Dim.	PmB 40/100- 65H	PmB 45 A	50/70 TRM	50/70 Bruns	50/70 Venezuela	50/70 Mittlerer Osten
EwP. R u K	°C	74,7	57,3	51,7	50,2	51,6	50,7
Brechpunkt	°C	-22	-17	-14	-13	-14	-9
Nadelpenetration	1/10mm	65	46	57	59	53	57
El. Rückstellung	%	92	68	9	12	11	15
Kraftduktilität A-400	J	0,846	0,378	0,076	0,060	0,060	0,070
Kraftduktilität A-600	J	1,737	0,473	0,076	0,060	0,060	0,070
BBR m-Wert	-	0,518	0,408	0,452	0,466	0,445	0,445
BBR Steifigkeit	MPa	57,97	188,08	132,65	132,98	140,70	122,64
DSR - G*	Pa	7.092	8.742	2.977	2.815	3.289	3.304
DSR - δ	°	58,41	74,68	85,58	86,2	86,01	85,46

Tabelle 2: Ergebnisse der Prüfungen am Gestein

	Kalkstein	Gabbro	Basalt	Taunusquarzit	Granit
Rohdichte	2,714	2,887	3,035	2,652	2,642
Anforderung Gestein StB 04	TL- 2,65-2,85	2,70-3,00	2,85-3,05	2,60-2,75	2,60-2,80
LA Kategorie	LA ₃₀	LA ₁₅	LA ₁₅	LA ₂₀	LA ₂₀
Anforderung Gestein StB 04	TL- LA ₃₀	LA ₂₅	LA ₂₅	LA ₃₀	LA ₃₀
SZ Kategorie	SZ ₂₆	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₂₂	SZ ₁₈
Anforderung Gestein StB 04	TL- SZ ₃₂	SZ ₂₂	SZ ₂₂	SZ ₂₆	SZ ₂₆
Kornform Kategorie	Sl ₃₀ ¹⁾	Sl ₁₅	Sl ₂₀	Sl ₁₅	Sl ₁₅
Anforderung Gestein StB 04	TL-	eine der folgenden Kategorien: Sl ₁₅ , Sl ₂₀ oder Sl ₅₀			
Wasseraufnahme [M.-%]	0,1	0,5	0,8 ²⁾	0,5	0,4
Anforderung Gestein StB 04	TL-	≤ 0,5			

¹⁾ Abweichung gering und auf kleine Probenmenge zurückzuführen

²⁾ erfüllt jedoch alternativ laut RG-Min Prüfbericht das Kriterium "Widerstand gegen Frostbeanspruchung"

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Prüfungen am Einzelkorn sowie der Randwinkelmessungen

		Rolling-Bottle-Test Umhüllung 48h [%]	Statisches Verfahren Anteil Körner mit Ablösung [%]	Ablösen in siedendem Wasser [%]	Randwinkel- messung [°]
Gabbro	+ PmB 40/100-65H	45,0		17	
	+ PmB 45 A	43,3	0 (SN) 2,9 (mod. EN, 72h)	16	
	+ 50/70 TRM	40,0			20,5
	+ 50/70 Bruns	42,5	0 (SN) 4,1 (mod. EN, 72h)		21,9
	+ 50/70 Venezuela	38,7		17 (5min); 21 (90min)	18,3
Basalt	+ PmB 40/100-65H	53,4 (SN 52,4)			
	+ PmB 45 A	56,3 (SN 43,3)			
	+ 50/70 TRM	33,8 (SN 36,4)			
	+ 50/70 Bruns	31,7 (SN 29,4)			
	+ 50/70 Venezuela	46,0			
Kalkstein	+ PmB 40/100-65H	73,8 (SN 84,2)		2 - 3	
	+ PmB 45 A	78,3 (SN 69,0)	4,2 (mod. EN, 72h)	4 - 6	
	+ 50/70 TRM	58,8 (SN 65,5)			22,7
	+ 50/70 Bruns	48,8 (SN 65,9)	11,5 (mod. EN, 72h)		19,0
	+ 50/70 Venezuela	66,0		5 - 5,5	21,6
Granit	+ PmB 40/100-65H	25,0 (SN 28,2)		nicht eindeutig	
	+ PmB 45A	48,3 (SN 44,8)		nicht eindeutig	
	+ 50/70 TRM	7,5 (SN 16,3)	0 (SN)		
	+ 50/70 Bruns	18,8 (SN 17,2)			
	+ 50/70 Venezuela	33,8		nicht eindeutig	
Taurusquarzit	+ PmB 40/100-65H	3,3 (SN 10,0)			
	+ PmB 45A	21,3 (SN 31,0)	15,3 (mod. EN, 72h)		
	+ 50/70 TRM	1,7 (SN 2,2)			18,4
	+ 50/70 Bruns	18,3 (SN 30,6)	0 (SN) 16,8 (mod. EN, 72h)		19,1
	+ 50/70 Venezuela	16,3			16,6

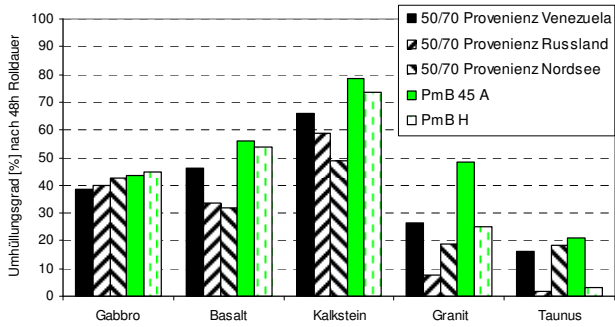


Bild 2: Rolling-Bottle-Test: Umhüllungsgrade nach 48 h Rolldauer

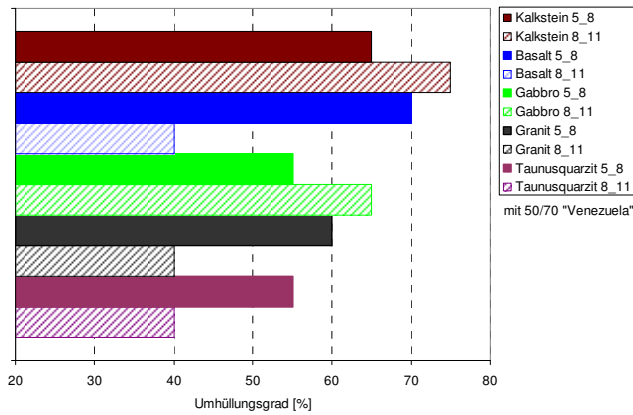


Bild 3: Rolling-Bottle-Test: Einfluss der Körnung auf Umhüllungsgrade nach 48 h Rolldauer

3.3 Prüfungen am verdichteten Mischgut

3.3.1 Änderung der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung

In den folgenden Bildern sind ausgewählte Ergebnisse zum Einfluss der Gesteinsart auf den Abfall der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung (ITSR-Wert) zusammenfassend dargestellt.

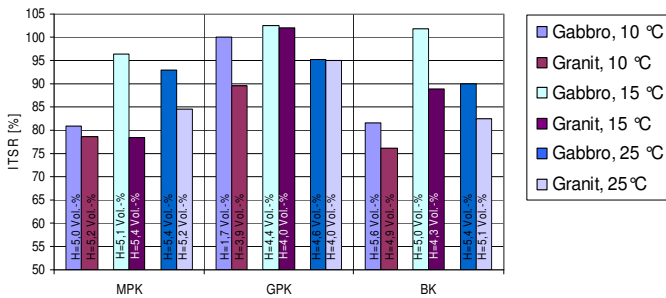


Bild 4: Asphaltbeton AB 0/11 S mit 50/70 TRM: Einfluss der Gesteinsart auf den ITSr-Wert

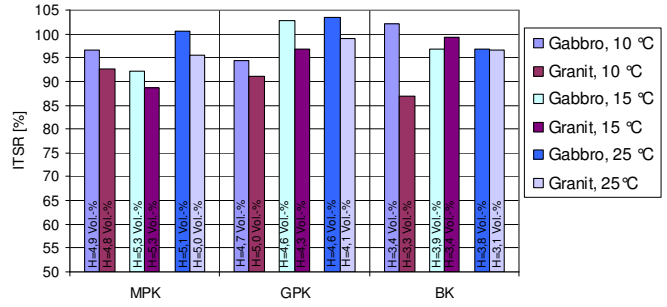


Bild 5: Splittmastixasphalt SMA 0/11 S mit PmB 45A: Einfluss der Gesteinsart auf den ITSr-Wert

In Bild 6 und 7 sind ausgewählte Ergebnisse zum Einfluss der Bindemittelart /-sorte auf den ITSr-Wert für Asphaltbinder und Splittmastixasphalt dargestellt.

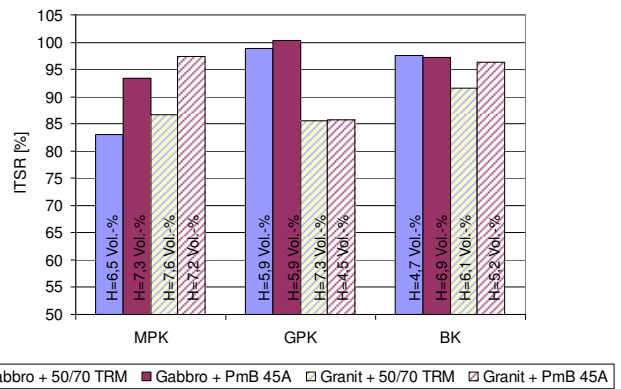


Bild 6: Asphaltbinder ABI 0/16 S bei 15 °C: Einfluss der Bindemittelart /-sorte auf den ITSr-Wert

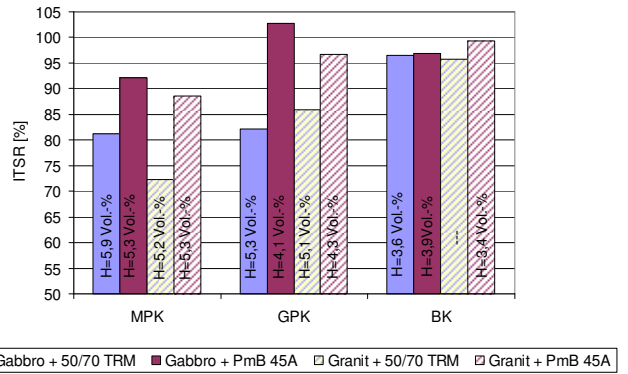


Bild 7: Splittmastixasphalt SMA 0/11 S bei 15 °C: Einfluss der Bindemittelart /-sorte auf den ITSr-Wert

Ausgewählte Ergebnisse zum Einfluss der Probekörperart auf den ITSr-Wert zeigen die folgenden Bilder.

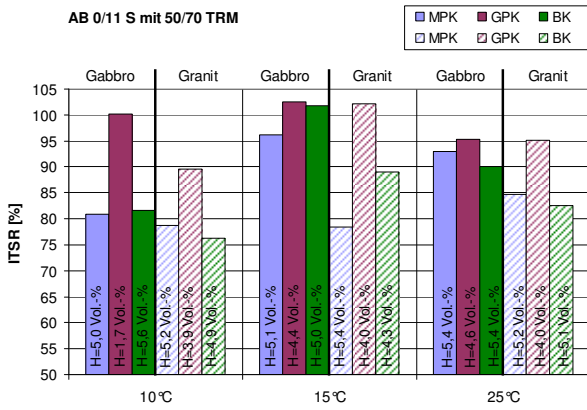


Bild 8: Asphaltbeton AB 0/11 S mit 50/70 TRM: Einfluss der Probekörpertart auf den ITSR-Wert

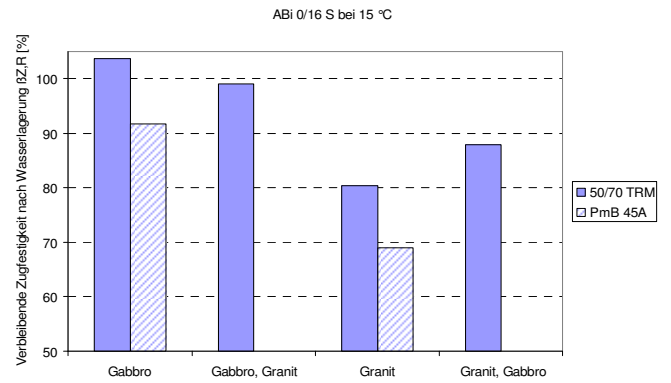


Bild 11: Asphaltbinder ABI 0/16 S: Einfluss der Gesteinsart sowie Bindemittelart /-sorte auf die verbleibende Zugfestigkeit nach Wasserlagerung ($\beta_{z,R}$)

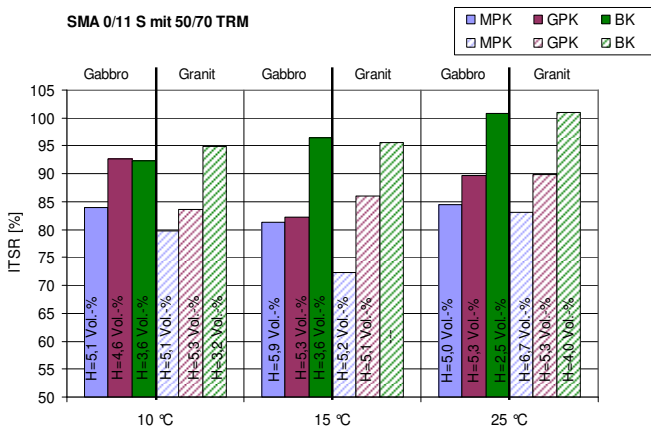


Bild 9: Splittmastixasphalt SMA 0/11 S mit 50/70 TRM: Einfluss der Probekörpertart auf den ITSR-Wert

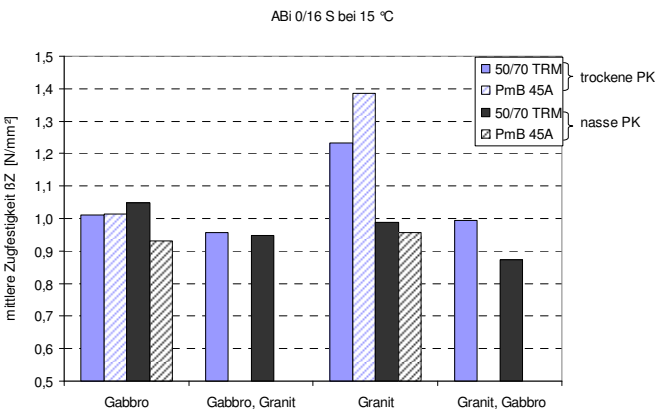


Bild 12: Asphaltbinder ABI 0/16 S: Einfluss der Gesteinsart sowie Bindemittelart /-sorte auf die mittlere Zugfestigkeit (β_z)

3.3.2 Zentrischer Zugversuch

Ausgewählte Ergebnisse der zentrischen Zugversuche nach Wasserlagerung sind in den folgenden Bildern gegenübergestellt.

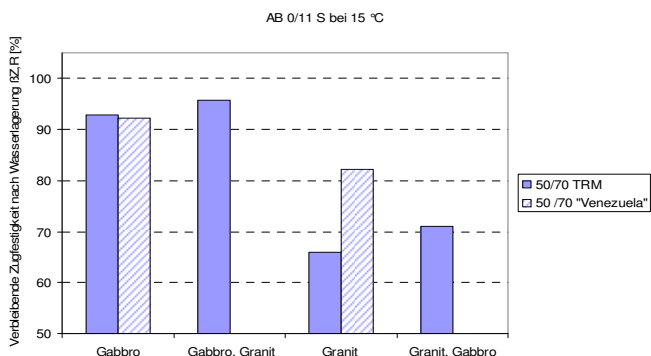


Bild 10: Asphaltbeton AB 0/11 S: Einfluss der Gesteinsart sowie Bindemittelart /-sorte auf die verbleibende Zugfestigkeit nach Wasserlagerung ($\beta_{z,R}$)

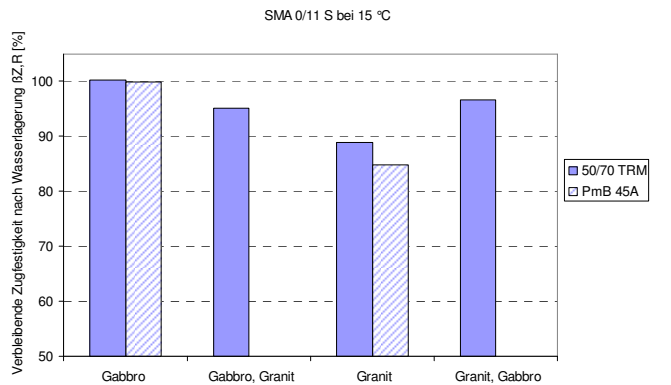


Bild 13: Splittmastixasphalt SMA 0/11 S: Einfluss der Gesteinsart sowie Bindemittelart /-sorte auf die verbleibende Zugfestigkeit nach Wasserlagerung ($\beta_{z,R}$)

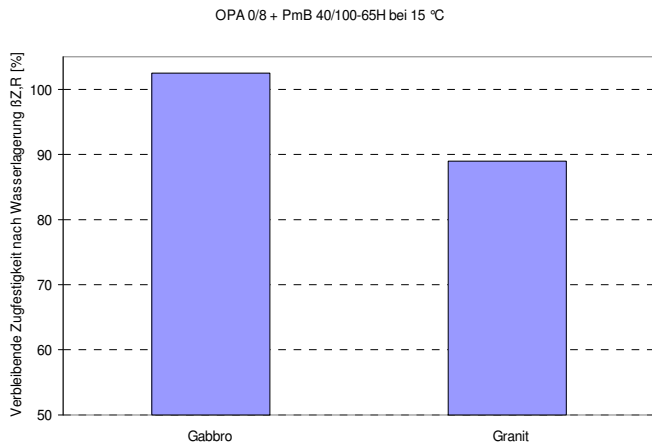


Bild 14: Offenporiger Asphalt OPA 0/8: Einfluss der Gesteinsart auf die verbleibende Zugfestigkeit nach Wasserlagerung ($\beta_{z,r}$)

4 Beurteilung der Untersuchungsergebnisse

4.1 Bitumeneigenschaften

Insgesamt wurden an den untersuchten Bindemitteln Kennwerte ermittelt, die ihrer Größe nach für die jeweilige Bitumenart /-sorte als "durchaus marktüblich" einzustufen sind.

4.2 Gesteinseigenschaften

Alle im Rahmen dieses Forschungsprojekts verwendeten Gesteinsarten erfüllen (bis auf die begründete Ausnahme der Kornform am Kalkstein) die nach den TL Gestein-StB 04 gestellten Anforderungen. Damit kann von einer für den Straßenbau geeigneten, repräsentativen Auswahl der Gesteine bezüglich ihrer Eigenschaften ausgegangen werden.

4.3 Prüfungen am Einzelkorn

4.3.1 Rolling-Bottle-Test

Die mit dem Rolling-Bottle-Test gemäß DIN EN 12697-11A erzielten Prüfergebnisse sind insgesamt plausibel und nachvollziehbar. Die aufgrund ihrer mineralogischen Eigenschaften als "haftkritisch" eingestuft Gesteinsarten Granit und Taunusquarzit zeigen die niedrigsten Umhüllungsgrade nach einer Rolldauer von 48 Stunden beziehungsweise 72 Stunden und werden dementsprechend im Vergleich zu den "haftunkritischen" Gesteinsarten schlechter beurteilt (Bild 2). Somit lässt sich mit dem Rolling-Bottle-Test das Haftvermögen der unterschiedlichen Gesteinsarten ausreichend differenziert ansprechen (Unterschied zwischen "haftkritischen" und "haftunkritischen" Gesteinsarten > 10 %).

Der Rolling-Bottle-Test wird daher auf Grundlage der im Rahmen dieses Projekts gemachten Erfahrungen als ein geeignetes Verfahren zur Beurteilung des Haftvermögens an der Einzelkörnung beurteilt. Es wird aber empfohlen, in Folgeuntersuchungen das Verfahren unter Berücksichtigung folgender sich aus dem Projekt ergebenden Erfahrungen zu optimieren:

- Die Prüfkörnung 8/11 mm eignet sich gegenüber der Prüfkörnung 5/8 mm besser zur visuellen Schätzung des Umhüllungsgrades. Des Weiteren birgt eine kleine Prüfkörnung die Gefahr der Verklebung der bitumenumhüllten Gesteinskörner während des Rollvorgangs und führt im Schnitt zu geringeren Umhüllungsgraden.

- Es kann ein Einfluss der Schiefstellung der Flaschen auf das Ergebnis festgestellt werden. Eine zu große Schiefstellung der Flaschen (30°) führt zu vermehrtem Verkleben der bitumenumhüllten Einzelprobe und damit eher zu einem unbrauchbaren Ergebnis. Eine normative Angabe bezüglich der anzuwendenden Schiefstellung der Flaschen wäre vorteilhaft. Ein Winkel von 5° hat sich als brauchbar erwiesen.
- Die nachteilige, relativ lange Versuchsdauer bei Anwendung der Rolldauer von 72 Stunden kann verkürzt werden, weil die Umhüllungsgrade bereits nach 48 Stunden aussagekräftig genug sind, um gesteins- und bitumendifferenzierende Ergebnisse zu erhalten.
- Der subjektive Einfluss durch die visuelle Schätzung des Umhüllungsgrades sollte durch die aufgezeigte Anwendung einer computergestützten Bildauswertung minimiert werden.

4.3.2 Statische Wasserlagerung

Die mit der statischen Wasserlagerung gemäß DIN EN 12697-11B erzielten Ergebnisse unter normgerechten Prüfbedingungen (48 Stunden Wasserlagerung bei 19 °C Wassertemperatur) zeigten praktisch keine Bitumenablösung.

Eine "Verschärfung" der Prüfbedingungen brachte keine Verbesserung der Aussagekraft, weder eine Verlängerung der Wasserlagerung auf 72 Stunden noch eine Erhöhung der Wassertemperatur auf 60 °C bei einstündiger Wasserlagerung (in Anlehnung an die Schweizer Norm SN 671960). Somit sind die in der DIN EN 12697-11B enthaltenen Prüfbedingungen für die in Bezug auf die im Prüfumfang enthaltenen Gesteine als unbrauchbar zu beurteilen. Auch ist die Zeitdauer von einer Stunde Wasserlagerung gemäß Schweizer Norm SN 671960 als zu kurz einzustufen, um brauchbare Ergebnisse zu ermitteln.

Durch die Modifikation der Prüfbedingungen auf 72 Stunden Wasserlagerung bei 40 °C Wassertemperatur wurde eine geringe Verbesserung der Aussagekraft erzielt. Ein Gesteinfluss, wie auch (in abgeschwächter Form) ein Bindemittelfluss auf das Haftverhalten wurde festgestellt.

Insgesamt ist daher das Verfahren der statischen Wasserlagerung gemäß DIN EN 12697-11B zur Beurteilung des Haftvermögens an der Einzelkörnung als "wenig geeignet" zu bewerten.

4.3.3 Ablösung in siedendem Wasser

Zwar zeigten die Prüfungen am Kalkstein nachvollziehbare Ergebnisse, anhand denen eine schwache Differenzierung nach unterschiedlichen Bitumenarten /-sorten möglich wäre, allerdings musste bei der Prüfung von Gabbro die Expositionsdauer auf 120 Minuten und bei Granit auf 48 Stunden erhöht werden, um überhaupt eine Reaktion mit der Säure zu messen. Mit der erhöhten Expositionsdauer konnten die polymermodifizierten Bindemittel von den Straßenbaubitumen unterschieden werden. Für haftkritischen Granit konnten aber überhaupt keine verwertbaren Ergebnisse, trotz erhöhter Expositionsdauer erhalten werden.

Es ist auch anzumerken, dass die Verwendung von den für den Versuch notwendigen gesundheitsgefährdenden Chemikalien (Salzsäure, Flusssäure) bezüglich der Eignung des Verfahrens als Routinetest als nachteilig einzustufen ist.

Das Verfahren der Ablösung in siedendem Wasser gemäß DIN EN 12697-11C war somit insgesamt wenig zielführend. Eine Anwendung als Routineverfahren ist daher grundsätzlich abzulehnen.

4.3.4 Randwinkelmessung

Alle die mit der in diesem Forschungsprojekt angewendeten Methode gemessenen Randwinkel liegen jeweils deutlich unter 90° und repräsentieren damit alle ein schlechtes Haftverhalten. Eine ausreichend differenzierte Einordnung der Bitumen-Gestein-Kombinationen in "günstiges" oder "ungünstiges" Haftverhalten ist demnach nicht möglich.

Trotz zum Teil stark streuender Einzelwerte kann ein schwacher, aber plausibler Einfluss der Gesteinsart auf den Randwinkel festgestellt werden. Am Taunusquarzit (hoher SiO₂-Gehalt) wurden demnach kleinere Randwinkel und damit ein ungünstigeres Haftverhalten gegenüber dem Gabbro und Kalkstein nachgewiesen. Damit ergibt sich eine zu dem Rolling-Bottle-Test vergleichbare Reihung.

Ein einheitlicher Bindemittelinfluss ergibt sich allerdings nur für zwei der drei geprüften Gesteinsarten.

Aktuelle Forschungsergebnisse (Hirsch, u. a., 2008) weisen die Methode der Randwinkelmessung als geeignet zur Ansprache der spezifischen, physikalisch-chemischen Eigenschaften der Gesteins- und Bitumenoberflächen aus. Es lassen sich auf thermodynamischer Grundlage daraus Oberflächenenergien und Polaritäten für die Oberflächen der beiden Haftpartner ableiten, also spezifische adhäsive Beiträge quantifizieren. Nach (Hirsch, u. a., 2008) wird die resultierende Haftung zwischen Bitumen und Gesteinsoberfläche offenbar weniger von der alleinigen adhäsiven Wechselwirkung, sondern vor allem durch die Oberflächenbeschaffenheit des Gesteins (Kornform, Rauheit, Mikrotextrur) in Verbindung mit den kohäsiven Eigenschaften des Bindemittels beeinflusst. Dadurch begründen sich eventuell auftretende Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Randwinkelmessungen und jenen des Rolling-Bottle-Tests.

4.4 Prüfungen am Asphalt

4.4.1 Abfall der Spaltzugfestigkeit

Die in der Varianzanalyse ermittelten Fehleranteile waren generell durch die stark streuenden Einzelergebnisse hoch. Das bedeutet, dass ein hoher Anteil der Ergebnisse statistisch gesehen keiner systematischen Beeinflussung durch die einbezogenen Einflussfaktoren unterliegt. Zusammenfassend wird festgehalten:

Zum Einfluss der Gesteinsart:

- An den Asphaltbeton-Varianten wirkt sich Granit im Vergleich zur Gesteinsart Gabbro insgesamt ungünstig auf die Wasserempfindlichkeit aus. Eindeutiger lässt sich dies an den Varianten mit nur einer Gesteinsart festmachen, wohingegen die gesteinspezifischen Unterschiede an den Kombinationen mit Gesteinsgemischen ohne einheitliche Tendenz ausfallen.
- Am Asphaltbinder sind die festgestellten gesteinsabhängigen Unterschiede gering und ebenfalls ohne einheitliche Tendenz.
- An den Splittmastixasphalt-Varianten (mit Straßenbaubitumen) kann ein (schwacher) Gesteinseinfluss festgestellt werden. Die Verwendung von Gabbro wirkt sich im Vergleich zum Granit günstig auf die Wasserempfindlichkeit aus. Für die Varianten mit

unterschiedlichen Gesteinsarten in Splitt- und Brechsandfraktion konnte keine plausible Reihung ermittelt werden.

- Als nennenswert wird der Gesteinseinfluss an den SMA- und OPA-Varianten (mit PmB) beurteilt. Granit wirkt sich in diesen Fällen ungünstig auf die Wasserempfindlichkeit aus.

Zum Einfluss der Bindemittelart /-sorte:

- Insgesamt konnten weitestgehend einheitliche Reihungen der Bindemittel bezüglich ihrer Auswirkung auf die Wasserempfindlichkeit über alle Mischgut- und Gesteinsarten hinweg durch die Prüfung von MPK bei einer Prüftemperatur von 15 °C gewonnen werden.
- Der Einfluss der Provenienz des Bindemittels 50/70 zeigt sich am Asphaltbeton AB 0/11 S uneinheitlich, das heißt von der verwendeten Gesteinsart abhängig. Statistisch ist kein einzelner Einfluss der Merkmalsgröße Bindemittel auf die Gesamtvariabilität feststellbar. Lediglich die Wechselwirkung zwischen Bindemittel und Prüftemperatur ist als schwache Einflusskombination zu nennen.
- Am Asphaltbinder übt PmB einen vorteilhaften Einfluss auf die Wasserempfindlichkeit an den MPK für beide eingesetzten Gesteinsarten aus. Für die übrigen Probekörperarten wurden streuende Ergebnisse erhalten. Der Merkmalsgröße Bindemittel kann jedoch insgesamt kein statistisch nennenswerter Einfluss auf den ITSR-Wert zugeschrieben werden. Vielmehr liegt hier eine schwache Wechselwirkung zwischen Bindemittel und Probekörperart (Varianzanteil 8,5 %) vor.
- An den SMA-Varianten wirkt sich der Einsatz des PmB im Vergleich zum Bitumen 50/70 vorteilhaft auf die Hafteigenschaften aus. Der gefundene Zusammenhang wurde statistisch nachgewiesen.

Zum Einfluss der Probekörperart:

- Die Probekörperart hat wegen der damit zusammenhängenden, unterschiedlichen Hohlraumgehalte, einen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis der Spaltzug-Prüfung. Probekörper mit kleineren Hohlraumgehalten (GPK, BK) im Vergleich zu den MPK führen insgesamt gesehen zu höheren ITSR-Werten. Für die AB-Varianten ergibt sich eine erkennbare Korrelation, für die ABI- und SMA-Varianten schwächt sich dieser Zusammenhang ab.
- Am ABI mit PmB führt eine Überlagerung der Einflüsse Probekörperart, Bindemittelart sowie Gesteinsart zu gegenläufigen Ergebnissen (niedrigere ITSR-Werte an GPK und BK im Vergleich zu den MPK). Die Überlagerung wird in dem Varianzanteil von 7,5 % für die Wechselwirkung der drei genannten Einflussfaktoren deutlich.
- Unter Verwendung des Straßenbaubitumens 50/70 TRM wird an allen Asphaltarten mit Ausnahme des OPA 0/8 die Probekörperart als der größte Einflussfaktor auf die Gesamtvariabilität identifiziert.
- Um möglichst differenzierte Ergebnisse zu erhalten, ist auf Grundlage der erhaltenen Erkenntnisse die Verwendung von MPK zu empfehlen, die im Vergleich zu BK und insbesondere GPK üblicherweise einen höheren Hohlraumgehalt aufweisen. Alternativ wäre

auch die Anpassung des Verdichtungsregimes bei der Herstellung der GPK bzw. Asphalt-Probekörpern (für die BK) denkbar, wodurch höhere Hohlraumgehalte erzielt würden.

Zum Einfluss der Prüftemperatur:

- Es besteht ein Zusammenhang zwischen Prüftemperatur und Spaltzugfestigkeit [kN], der unabhängig von Probekörper- und Mischgutart festgestellt wurde. Mit sinkender Prüftemperatur werden größere Spaltzugfestigkeiten erhalten (siehe Beispiele in Bild 15). Im Gegensatz dazu lieferte die Gegenüberstellung der ITSR-Werte [%] verschiedener Varianten einer Asphaltart keine systematischen Zusammenhänge zwischen Prüftemperatur und ITSR-Wert.
- Durch Mittelwertvergleiche und Varianzanalysen lässt sich aufzeigen, dass bei allen untersuchten Asphaltarten kein signifikanter Einfluss der Prüftemperatur auf die ITSR-Werte feststellbar ist.
- Statistisch ergibt sich bei keiner Asphaltart ein Varianzanteil über 6 %.
- Es sind lediglich nennenswerte Wechselwirkungen zwischen Prüftemperatur und Bindemittel (am AB) und zwischen Prüftemperatur und Gesteinsart (am OPA) nachweisbar.
- Da sich die Prüftemperatur nach diesen Untersuchungen in nur sehr geringem Maß auf die ITSR-Werte auswirkte, lässt sich prinzipiell eine beliebige Prüftemperatur zwischen 10 und 25 °C ohne nachteilige Wirkungen anwenden. Erfahrungen aus früheren Forschungsaktivitäten (Arand, 1998; Arand, u. a., 1991) sehen in niedrigeren Prüftemperaturen den Vorteil, dass ein Quetschbruch, wie er grundsätzlich bei höheren Prüftemperaturen auftreten kann, vermieden wird.

Belegungszahl der zentrischen Zugversuche die Erkenntnisse zu verstehen, die einer weitergehenden Untersuchung und Verifizierung bedürfen. Zusammenfassend wird festgehalten:

- An allen untersuchten Asphaltarten kann der ungünstige Einfluss des Granits auf die Wasserempfindlichkeit differenziert herausgestellt werden. An den ABi-Varianten ergeben sich tendenziell die größten Unterschiede, während diese an den SMA-Varianten geringer ausfallen.
- Die Varianten mit zwei unterschiedlichen Gesteinsarten in Splitt- und Brechsandfraktion zeigen keine eindeutigen gesteinsabhängigen Tendenzen.
- An den AB- und SMA-Varianten können keine eindeutigen bindemittelspezifischen Unterschiede erkannt werden.
- In Verbindung mit dem Straßenbaubitumen sind an beiden ABi-Varianten (Gabbro und Granit) anhand der verbleibenden Zugfestigkeiten nach Wasserlagerung [%] geringe Vorteile gegenüber den PmB bezüglich der Wasserempfindlichkeit feststellbar. Anhand der Absolutwerte der mittleren Zugfestigkeiten relativiert sich diese Feststellung, PmB und Straßenbaubitumen sind danach als gleichwertig zu betrachten.
- Durch die Variation von Prüftemperatur (10 °C) und der Ziehgeschwindigkeit (3,0 mm/min) konnten im Vergleich zu den anfänglichen Prüfparametern (TPrüf = 15 °C und Ziehgeschwindigkeit von 1,5 mm/min) keine differenzierteren Ergebnisse erhalten werden.

5 Zusammenfassende Beurteilung

Einen Überblick zu den festgestellten Vor- und Nachteilen je Prüfverfahren sowie eine Beurteilung der Eignung als Routineprüfung zeigt nachfolgende Tabelle 4.

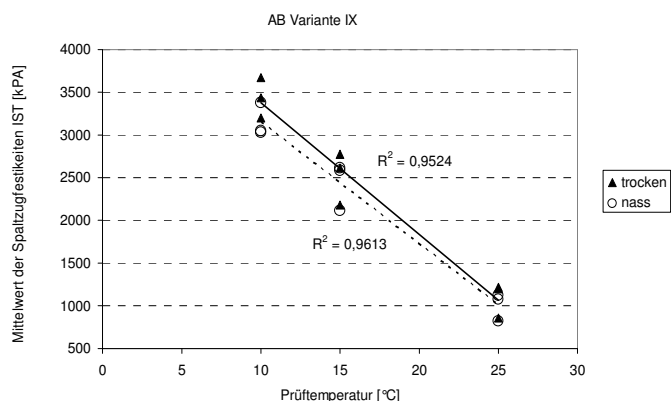


Bild 15: Asphaltbeton AB Variante IX: Zusammenhang zwischen Prüftemperatur und Spaltzugfestigkeit [kN]

4.4.2 Zentrische Zugversuche

Die mit dem zentrischen Zugversuch erhaltenen Ergebnisse deuten auf eine Eignung des Versuchs zur Ermittlung des Festigkeitsabfalls an prismatischen Asphalt-Probekörpern infolge von Wassereinwirkung hin. Die Hafteigenschaften unterschiedlicher Gesteinsarten und zum Teil auch der Bindemittel einfluss konnten im Rahmen dieses Projekts prüftechnisch differenziert angesprochen werden. Allerdings sind aufgrund des begrenzten Untersuchungsumfanges und der geringen

Tabelle 4: Überblick zu den festgestellten Vor- und Nachteilen je Prüfverfahren sowie Beurteilung der Eignung als Routineprüfung

	Prüfverfahren	Vorteile	Nachteile	Eignung als Routineprüfung
am Einzelkorn	Rolling-Bottle-Test (DIN EN 12697-11A)	<ul style="list-style-type: none"> - einfacher Versuchsaufbau und -durchführung - insgesamt plausible und nachvollziehbare Ergebnisse - differenzierte Ansprache des Haftvermögens unterschiedlicher Gesteinsarten und Bitumenarten /-sorten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - subjektiver Einfluss bei der visuellen Schätzung des Umhüllungsgrades - teilweise lange Versuchsdauer (bis 72h) - mechanische Beanspruchung durch Rollbewegung wenig realitätsnah - für bestimmte Bitumen-Gesteins-Kombinationen nur eingeschränkt anwendbar 	gut (Auswerteverfahren zu verbessern)
	statische Wasserlagerung (DIN EN 12697-11B)	<ul style="list-style-type: none"> - Modifikation der Prüfbedingungen (72h Wasserlagerung bei 40 °C) bringt Verbesserung der Differenziertheit bezüglich Gesteins- und Bindemiteleinfluss 	<ul style="list-style-type: none"> - Ergebnisse unter normgerechten Prüfbedingungen praktisch unbrauchbar 	keine
	Ablösung in siedendem Wasser (DIN EN 12697-11C)	<ul style="list-style-type: none"> - Unterscheidung Straßenbaubitumen/PmB mit erhöhter Expositionsdauer möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Verwendung gesundheitsgefährdender Chemikalien - für die untersuchten Kombinationen insgesamt keine zufriedenstellenden Ergebnisse 	keine
	Randwinkelmessung (am Bitumen-Tri-Tropfen unter Wasser)	<ul style="list-style-type: none"> - schwacher, plausibler Einfluss der Gesteinsart auf Randwinkel feststellbar - Eignung zur Ansprache der physikalischen-chemischen Eigenschaften der Gesteins- und Bitumenoberflächen, um deren jeweiligen Beitrag zur Adhäsion zu quantifizieren 	<ul style="list-style-type: none"> - alle gemessenen Randwinkel < 90°, wodurch keine Einordnung in "günstiges" / "ungünstiges" Haftverhalten möglich 	keine (nur für die hier angewandte Methode!)
am verdichteten Mischgut	Abfall der Spaltzugfestigkeit (ITSR) (DIN EN 12697-12)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesteineinfluss für bestimmte Varianten (OPA 0/8 und SMA 0/11 S in Verbindung mit PmB) plausibel nachweisbar - Nachweis des vorteilhaften Einflusses von PmB auf Haftvermögen im Vergleich zu Straßenbaubitumen an ABi und SMA-Varianten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - teilweise große Streuung der Einzelergebnisse - ITSR-Werte von ≥ 100 % wenig aussagekräftig; Ursachen bisher ungeklärt - Variation der Gesteinsart in Splitt- und Brechsandfraktion führt zu unplausiblen Ergebnissen - Überlagerung mehrerer Einflussfaktoren (Temperatur, Probekörperart, Hohlraumgehalt) erschwert Interpretation - hohe Anzahl an herzustellenen Probekörpern (18 Stk.) 	bedingt
	Abfall der direkten Zugfestigkeit (zentrische Zugversuche)	<ul style="list-style-type: none"> - plausibler, differenzierter Gesteineinfluss nachweisbar 	<ul style="list-style-type: none"> - begrenzter Untersuchungsumfang/ Belegungszahl - weitere Untersuchungen notwendig 	(gut,) fortführende Untersuchungen zu empfehlen

6 Offene Fragen

6.1 Zum Rolling-Bottle-Test

Zur Interpretation der Ergebnisse des Rolling-Bottle-Tests wurde ein neues, am Institut des Forschungsnehmers entwickeltes, auf der digitalen Bildanalyse basierendes Auswerteverfahren im Ansatz vorgestellt. Hierzu fehlen bislang Erfahrungen bezüglich der Verfahrenspräzision und ein Vergleich zu anderen, quantitativ ermittelten Umhüllungsgraden. In dieser Richtung wird Forschungsbedarf gesehen.

6.2 Zum Spaltzugversuch

Die Untersuchungen zum Abfall der Spaltzugfestigkeit ergaben teilweise uneinheitliche und wenig aussagekräftige Ergebnisse. Im Laufe der Untersuchungen trat wiederholt das Phänomen auf, dass nach der Wassereinwirkung höhere Spaltzugfestigkeiten als an den trocken geprüften Probekörpern gemessen wurden (ITSR-Wert $\geq 100\%$). Es bleibt offen, welche Ursachen für diesen Anstieg der Spaltzugfestigkeit angeführt werden können. Mögliche Untersuchungsansätze liegen in der Art der Vakuumbehandlung und Wasserlagerung, die Rolle der Hohlraumgeometrie bzw. des Hohlraumgehalts und einem möglichen Einfluss eines hydrostatischen Druckes in den Porenräumen des Asphalts. Da das Phänomen von ITSR-Werten $\geq 100\%$ bekannt ist und wiederholt in der Praxis auftritt, wird eine vertiefende Untersuchung zu möglichen Ursachen empfohlen.

Des Weiteren zeigte sich das ITSR-Verfahren als wenig aussagekräftig bei der differenzierten Ansprache von Varianten mit zwei verschiedenen Gesteinsarten in Splitt- und Brechsandfraktion des geprüften Asphaltmischguts. Aus diesen Gründen konnten nur Empfehlungen bezüglich der anzuwendenden Prüftemperatur und Probekörperart gegeben werden, die sich aus laborökonomischer Sicht und aus Erfahrungen von bereits durchgeführten Forschungsarbeiten ergeben.

Der prüftechnisch schwer erfassbare Einfluss unterschiedlicher Gesteinsarten in Splitt- und Brechsandfraktion konnte aufgrund des ohnehin umfangreichen Prüfprogramms nicht durch vertiefende Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben erarbeitet werden.

6.3 Zum zentrischen Zugversuch

Da die ersten Ergebnisse der zentrischen Zugversuche gegenüber dem Verfahren der Spaltzugfestigkeitsänderung als differenzierter und damit geeigneter zur Beurteilung des Haftverhaltens angesehen werden, wird angeregt, im Rahmen einer weiterführenden Forschungsarbeit die verfahrenstechnischen Randbedingungen für den zentrischen Zugversuch durch ein entsprechendes Untersuchungsprogramm zu optimieren und einen Erfahrungs- und Bewertungshintergrund zu schaffen. Dann sollte der zentrische Zugversuch in die Europäische Norm als Verfahren in die EN 12697-12 eingebracht werden und das dort beschriebene Verfahren über die Änderung der Spaltzugfestigkeit ersetzen.

7 Literatur

- Arand, W.; Renken, P. (1991): Auswahl und Optimierung einer Methodik zur Prüfung des Haftverhaltens zwischen Bindemitteln und Mineralstoffen. Forschungsauftrag Nr. 07.133 G87 E, i. A. der Bundesanstalt für Straßenwesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Arand, W. (1998): Prognostizierung des Haftverhaltens von Asphalten mittels Spaltzugfestigkeitsabfall – Schaffung eines Bewertungshintergrundes. AiF-Forschungsvorhaben Nr. 10.277, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Hirsch, V.; Friemel-Göttlich, B. (2008): Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode, Forschungsprojekt Nr. 3604001, Bergisch Gladbach.
- Schellenberger, W. (2004): Haftung zwischen Bitumen und Mineralstoff, in: Asphalt, 38 (2004), Heft 8, S. 28–39.