

Optimierung der Prüfbedingungen des Spurbildungsversuches

FA 7.180

Forschungsstelle: Institut Dr.-Ing Gauer (IFB) Ingenieurgesellschaft mbH für bautechnische Prüfungen, Regenstauf / Asphalt-Labor (AL) Arno J. Hinrichsen GmbH & Co, Niederlassung Schwerin

Bearbeiter: Gauer, P. K. / Hausinger, N.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

Abschluss: Oktober 2001

Vergleichsgröße:

Axiale Dehnung im Triaxialversuch mit oszillierendem Stützdruck
 Prüftemperatur 40 °C

2.2 Variationsmatrix

Die Prüfbedingungen wurden in einer unvollständigen Matrix variiert, woraus sich die in der Tabelle 1 zusammengestellte Konstellation ergab.

1. Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war, die Prüfbedingungen des Spurbildungsversuches unter Verwendung von mit dem Walzsektor-Verdichter hergestellten Probekörpern so zu verändern, dass die Ergebnisse des Spurbildungsversuches mit denen des dynamischen Triaxialversuches korrelieren.

Mit dem Spurbildungsversuch sollten nicht nur Ja/Nein-Entscheidungen getroffen, sondern auch differenziertere Abstufungen ermöglicht werden. Verformungsempfindlichere Mischungen sollen zwar erkannt, der Versuch dabei aber auch ohne "Strippingeffekte" ausgeführt werden können. Unter "Stripping" versteht man das Ablösen des Bindemittels von den Mineralstoffen.

Als Vergleichsbasis für die Spurbildungsversuche diente der dynamische Triaxialversuch mit oszillierendem Stützdruck. Dieser Versuch wurde vom Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig im Rahmen des über die AiF geförderten Forschungsvorhabens "Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung, Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes" entwickelt. Bei dieser Arbeit wurde der Verformungswiderstand unterschiedlicher Asphaltdeckschichtvarianten mit vier verschiedenen Prüfverfahren angesprochen. Die Ergebnisse zeigten, dass der Verformungswiderstand durch den dynamischen Triaxialversuch am Besten bewertet werden kann.

Tab. 1: Variationsmatrix

Nr	Prüfmedium	Prüftemperatur	Prüfrad
1	Luft	40 °C	Stahlrad gerundet (Stg)
2	Luft	50 °C	Stahlrad gerundet (Stg)
3	Luft	40 °C	Vollgummirad (Vgr)
4	Luft	50 °C	Vollgummirad (Vgr)
5	Luft	40 °C	Kunststoffrad „hart“ (Kuh)
6	Luft	50 °C	Kunststoffrad „hart“ (Kuh)
7	Luft	40 °C	Kunststoffrad „weich“ (Kuw)
8	Luft	50 °C	Kunststoffrad „weich“ (Kuw)
9	Wasser	40 °C	Stahlrad eben (Ste)
10	Wasser	50 °C	Stahlrad eben (Ste)
11	Wasser	40 °C	Stahlrad gerundet (Stg)
12	Wasser	50 °C	Stahlrad gerundet (Stg)
13	Wasser	40 °C	Vollgummirad (Vgr)
14	Wasser	50 °C	Vollgummirad (Vgr)

2. Untersuchungsmethodik

2.1 Prüfbedingungen im Spurbildungsversuch

Prüf- und Temperiermedium:

Luftbad und Wasserbad

Prüftemperatur:

40 °C und 50 °C

Art und Beschaffenheit des Belastungsrades:

- Stahlrad gemäß TPA
- Stahlrad mit gerundeten Kanten, r = 2,0 mm
- Vollgummirad, Shore-A-Härte 80
- Kunststoffrad weich, Polyethylen PE 1000
- Kunststoffrad hart, Polyamid-Nylon

Asphaltsorte (Bindemittelsorte):

- Asphaltbeton 0/11S (Bitumen 50/70)
- Splittmastixasphalt 0/11S (Bitumen 50/70)
- Asphaltbinder 0/16 (Bitumen 50/70)
- Asphaltbinder 0/16S (PmB 45)
- Asphaltbinder 0/22S (PmB 45)

3. Untersuchungsergebnisse

3.1 Probekörper

Die Probekörper wurden mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt. Die Verdichtungstemperaturen wurden dabei gemäß dem Merkblatt für Eignungsprüfungen für Bitumen 50/70 mit 135 °C und PmB 45 mit 145 °C festgelegt. Die angestrebte Probekörperdicke betrug beim AB 0/11S und SMA 0/11S je 4 cm, beim Abi 0/16 und Abi 0/16S je 6 cm und 8 cm beim Abi 0/22S. An den Probeplatten wurden entsprechend dem Entwurf der ALP A-StB die Raumdichte, der Verdichtungsgrad (bezogen auf Marshallprobekörper aus der Eignungsprüfung) und die Probekörperdicke untersucht.

Die Ergebnisse von Kontrolleextraktionen zeigen die Einhaltung der Vorgaben der Eignungsprüfung und belegen, dass bei der Herstellung der Platten im Walzsektor-Verdichtungsgerät auch bei den grobkörnigen Gemischen keine nachweisbaren Kornzertrümmerungen stattgefunden haben. Die weitere Vorbehandlung der Probeplatten für die Spurbildungsversuche erfolgte nach bzw. in Anlehnung an die TPA-Spurbildungsversuch. Ergänzend dazu wurden die Asphaltplatten im Luftbad zur Minimierung von Bindemittel- und Mörtelanhaftungen mit Graphit-spray und die Prüfräder mit Teflonspray behandelt.

3.2 Dynamischer Triaxialversuch mit oszillierendem Stützdruck

Die dynamischen Triaxialversuche wurden mit einer Versuchsdauer von 150.000 Lastwechseln durchgeführt. Für die Versuche wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 100 mm aus walzsektorverdichteten Platten erbohrt. Die Probekörper wurden durch planparalleles Schleifen auf die für den Versuch erforderliche Dicke gebracht. Der obere Scheitelwert der axial aufgetragenen Spannung wurde zu $\sigma_a = 0,8 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Dieser Wert blieb für die Prüfung aller Asphalte konstant. Auf Grund von Erfahrungswerten und Vorversuchen wurden die oberen Scheitelwerte für die Stützdrücke materialabhängig wie folgt festgelegt:

Asphaltbeton:	$\sigma_r = 0,30 \text{ N/mm}^2 \cong 3,0 \text{ bar}$
Splittmastixasphalt:	$\sigma_r = 0,22 \text{ N/mm}^2 \cong 2,2 \text{ bar}$
Asphaltbinder:	$\sigma_r = 0,35 \text{ N/mm}^2 \cong 3,5 \text{ bar}$

3.3 Spurbildungsversuche

3.3.1 Versuchsaufbau

Versuchsaufbau und -durchführung entsprachen bei allen Radvarianten prinzipiell den Bedingungen der TPA. Bei der Prüfung im Luftbad musste dies insbesondere für die Einhaltung der Prüftemperatur zutreffen.

3.3.2 Fotodokumentation der Probekörper

Nach Abschluss der Versuche wurden die Probekörper fotografisch dokumentiert. Dazu wurden die Asphaltplatten in einer Ansicht von oben und in einem Querschnitt in der Plattenmitte festgehalten.

3.4 Auswertung

3.4.1 Augenscheinliche Feststellungen und Beobachtungen

Anhaftungen an den Rädern

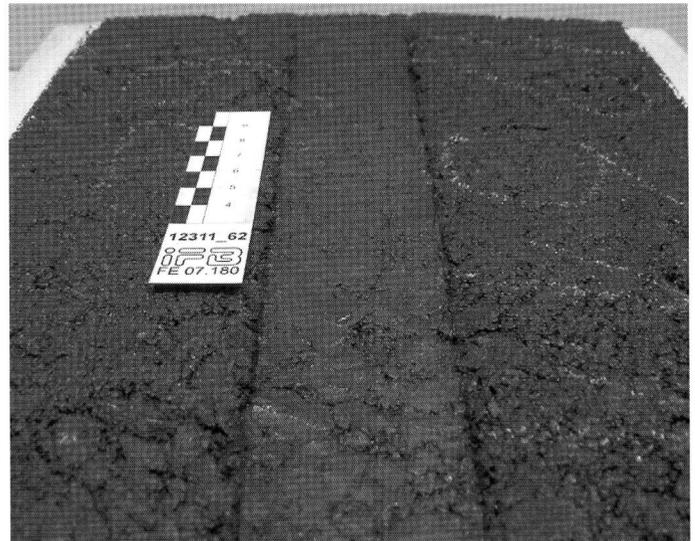
Trotz der Behandlung der Prüfräder und der Asphaltoberflächen bei Versuchen im Luftbad mit Trennmitteln wurden bei Asphaltbeton 0/11S und Splittmastixasphalt 0/11S Anhaftungen von Bindemittel, Mörtel oder Mörtel mit Splittkörnern an den Rädern beobachtet. Die Anhaftungen nehmen bei Luftversuchen mit dem gerundeten Stahlrad und den beiden Kunststoffrädern tendenziell mit steigendem Bindemittelgehalt und steigender Prüftemperatur zu.

Spurrinnenflächen

Als weiteres Beurteilungskriterium wurde die Beschaffenheit der von dem Prüfrad beanspruchten Fläche auf der Probeplatte untersucht. Hier können auch die "Strippingeffekte" erkannt werden. Auch die in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Anhaftungseffekte hinterlassen auf den Probekörpern deutliche Spuren. Die Bilder 1 und 2 zeigen exemplarisch die unter den Bedingungen "Luft 50 °C Vgr" und "Wasser 50 °C Ste" geprüften Proben des gleichen Asphaltgemisches.

Zustand der Prüfräder nach den Versuchen

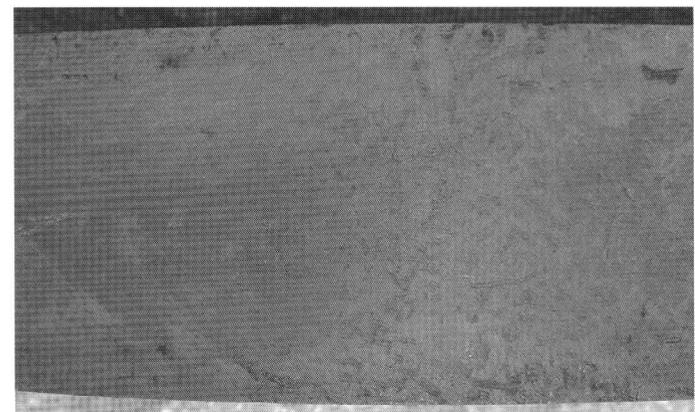
Die drei Stahlräderpaare (2 x Stg, 1 x Ste) zeigten nach Abschluss von jeweils 24 Versuchen, außer kleineren Kratzern, keinerlei Abnutzungserscheinungen. Die beiden Vollgummiräderpaare, die ebenfalls jeweils 24 Versuche absolvierten, zeigten dagegen leichte Einkerbungen und Risse auf der Lauffläche (Bild 3). Bei der anschließenden Härteprüfung nach Shore A (DIN 53 505) konnte aber keine Abweichung der ursprünglichen Shore-A-Härte von 80 gemessen werden. Die "harten" und "weichen" Kunststoffräder, die jeweils zwischen 4 und 8 Versuche absolvierten, zeigten ebenfalls Einkerbungen auf der Lauffläche (Bilder 4 und 5). Die Kanten der Lauffläche waren zum Teil "überläufig" bzw. leicht abgerundet. Die Kunststoffräder erwie-



1: Spurrinnenfläche bei Asphaltbeton 0/11S (6,2 M.-% Bindemittel) unter der Prüfbedingung „Luft, 50 °C, Vollgummirad“

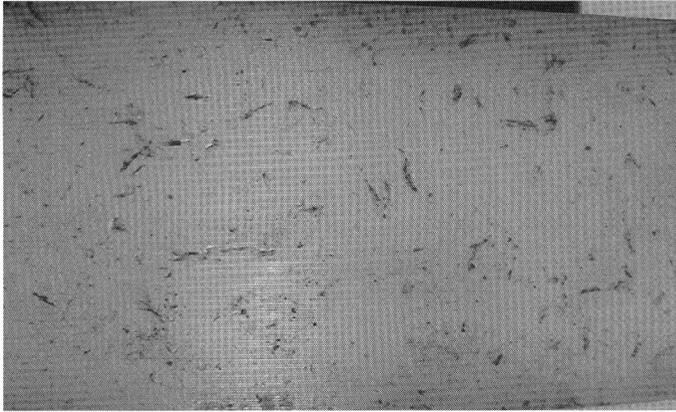


2: Spurrinnenfläche bei Asphaltbeton 0/11S (6,2 M.-% Bindemittel) unter der Prüfbedingung „Wasser, 50 °C, Stahlrad eben“

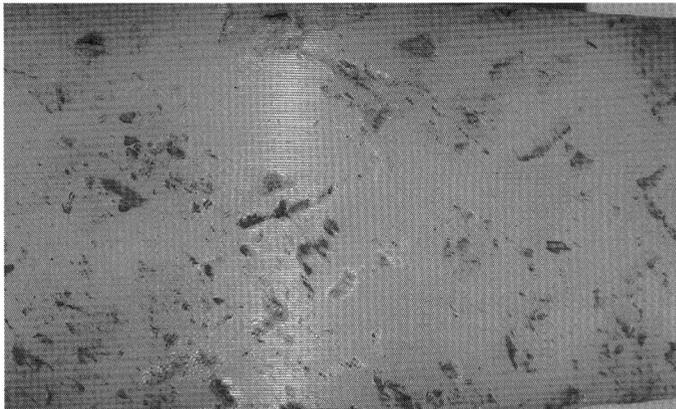


3: Vollgummirad nach 24 Versuchen

sen sich zudem als nicht formbeständig. Durch Kriechvorgänge entstand zwischen Felge und Kunststoffring ein messbarer Spalt.



4: Kunststoffrad „hart“ nach 8 Versuchen



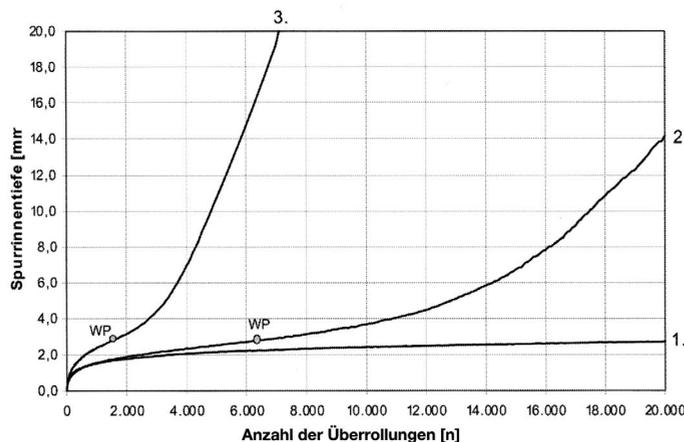
5: Kunststoffrad „weich“ nach 8 Versuchen

3.4.2 Spurbildungsverläufe

Der Verlauf von Spurbildungskurven lässt sich generell in drei verschiedene Gruppen einteilen. Diese drei charakteristischen Spurbildungsverläufe sind im Bild 6 dargestellt.

Der mit "1." gekennzeichnete Verlauf zeichnet sich durch 2 Phasen aus. Nach der Anfangsphase, in der sich die Probe unter Beanspruchung konsolidiert, folgt eine Phase, in der sich die Spurrinnentiefe etwa asymptotisch einem "Endwert" annähert. Die Konsolidierung der Proben ist in der Regel nach etwa 1.000 Überrollungen abgeschlossen.

Beim "2." charakteristischen Spurbildungsverlauf folgt nach dem Ende der Nachverdichtung und einem Bereich mit einer etwas steileren Kurve ein Wendepunkt, ab dem die Steigung der



6: Charakteristische Spurbildungsverläufe

Kurve stetig zunimmt. Der Wendepunkt liegt bei den untersuchten Proben im Bereich zwischen 3 500 und 14 000 Überrollungen.

Die "3." Kurve zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die "2." Kurve, nur mit einer wesentlich geringeren Anzahl von Überrollungen. So endet der Versuch zwischen 5 100 (AB 0/11S 6,2 M.-%) und 13 400 Überrollungen (Abi 0/16 4,2 M.-%) mit einer Spurrinnentiefe von 20,0 mm. Der Wendepunkt liegt dabei zwischen 1 100 und 3 300 Überrollungen.

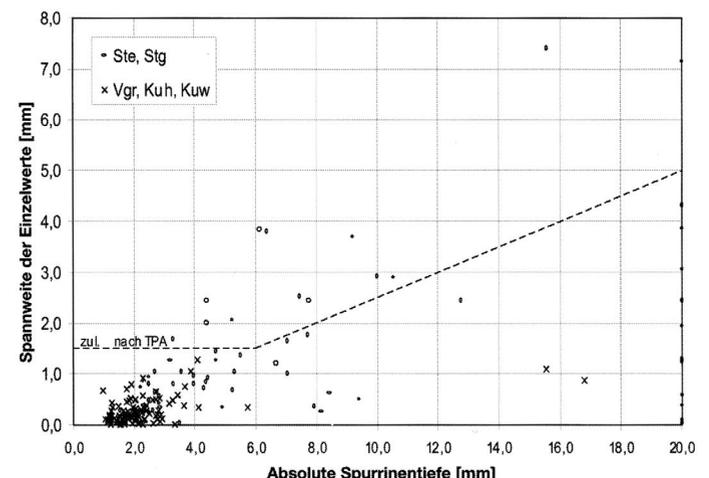
Der mit der Kurve "3." beschriebene Spurbildungsverlauf trat nur bei den "empfindlichen" Mischgutproben Asphaltbeton 0/11S, Splittmastixasphalt 0/11S und Asphaltbinder 0/16 im Zusammenhang mit Stahlrad (eben und gerundet) und 50 °C Wassertemperatur auf. Die zugehörigen Spurrinnenflächen zeigten bei all diesen Versuchen starke "Strippingeffekte". Der Kurvenverlauf "2." wurde sowohl bei der Verbindung von Stahlrad (eben und gerundet) mit 40 °C Wassertemperatur, wobei der "Strippingeffekt" temperaturbedingt in abgeschwächter Form ablief, als auch bei vier Versuchen mit 50 °C Lufttemperatur bei Probekörpern aus Asphaltbeton 0/11S beobachtet. Bei diesen vier Versuchen wurden zudem übermäßige Anhaftungen an den Prüfrädern festgestellt.

Zusammenfassend ergibt sich, dass ein Wendepunkt nur in Verbindung mit einem "schädlichen" Einfluss – "Stripping" oder Anhaftungen ("Sticking") – auftritt. Der Wendepunkt markiert dabei den Beginn der Zerstörung des Probekörpers. Bei den Spurbildungsversuchen mit dem Vollgummirad im Luft- oder Wasserbad wurden keine Wendepunkte im Kurvenverlauf beobachtet.

3.4.3 Spannweite der Einzelwerte

Einen Vergleich der ermittelten Spannweiten zwischen den beiden Einzelwerten mit den quasi vorläufigen Präzisionsangaben der TPA liefert das Bild 7, in dem die Differenzwerte über der absoluten Spurrinnentiefe aufgetragen sind. Die abgeknickte Linie gibt die TPA-Bedingungen wieder, wonach bis zu einer Spurtiefe von 6,0 mm eine zulässige Spannweite von 1,5 mm gilt, darüber eine solche von 25 % des Mittelwertes. Die Versuche mit Stahlrädern sind mit Kreisen, alle anderen mit Kreuzen dargestellt.

Man erkennt, dass alle Überschreitungen der vorläufigen Präzisionsgrenze mit Kreisen gekennzeichnet sind. Der mittlere Wert aller Kreuze dürfte unter 0,5 mm liegen, woraus sich bei einem augenscheinlich geschätzten Mittelwert der Spurrinnentiefe um 2,0 mm eine Bestätigung der 25 %-Marke auch im unteren Messbereich und damit eine deutliche Verbesserung gegenüber den bisher bekannten Präzisionswerten ableiten ließe.



7: Spannweite der Einzelwerte in Abhängigkeit der absoluten Spurrinnentiefe

3.4.4 Vergleich der Ergebnisse

Grafische Darstellungen

Spurrinntiefe

Bild 8 zeigt beispielhaft die "extremen" Asphaltarten Asphaltbeton 0/11S und Asphaltbinder 0/22S. Auffällig sind beim AB 0/11S die Einflüsse aus "Stripping" oder "Sticking". Außerdem fällt die geringe Differenzierung zwischen den Versuchen bei einer Prüftemperatur von 40°C auf. Der Vergleich der Kurvenverläufe der relativen mit den absoluten Spurrinntiefen zeigt grundsätzlich mit Ausnahme der nicht auswertbaren "Abbruchversuche" das jeweils gleiche Bild.

Spurrate

Auch bei den Spurraten I und II zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den absoluten Spurrinntiefen. Die Übereinstimmung zwischen den Spurraten und dem Triaxialversuch wird hier noch begünstigt, weil die Spurraten bei den "Abbruchversuchen" nicht dargestellt werden konnten. Des Weiteren werden die durch die bereits beschriebenen Anhaftungen oder Stripping-Effekte geprägten Versuchsergebnisse noch deutlicher als bei der Betrachtung der absoluten oder relativen Spurrinntiefe. Letztere sind insbesondere dadurch auffällig, als sich die restlichen Werte, hier wiederum besonders die bei Prüftemperaturen von 40 °C erhaltenen, auf einem relativ niedrigen Niveau bewegen und nur vereinzelt Veränderungen unter dem Einfluss der variierten Bindemittelmenge erkennen lassen.

Relative Änderung der Verformungswerte

Aus der grafischen Darstellung der Ergebnisse lässt sich zum Teil eine augenscheinlich gute Anpassung der Ergebnisse der Spurbildungsversuche an die Ergebnisse der dynamischen Triaxialversuche feststellen, die sich aber wegen der unterschiedlichen Einheiten und Bezugsgrößen mathematisch nicht direkt ausdrücken lässt.

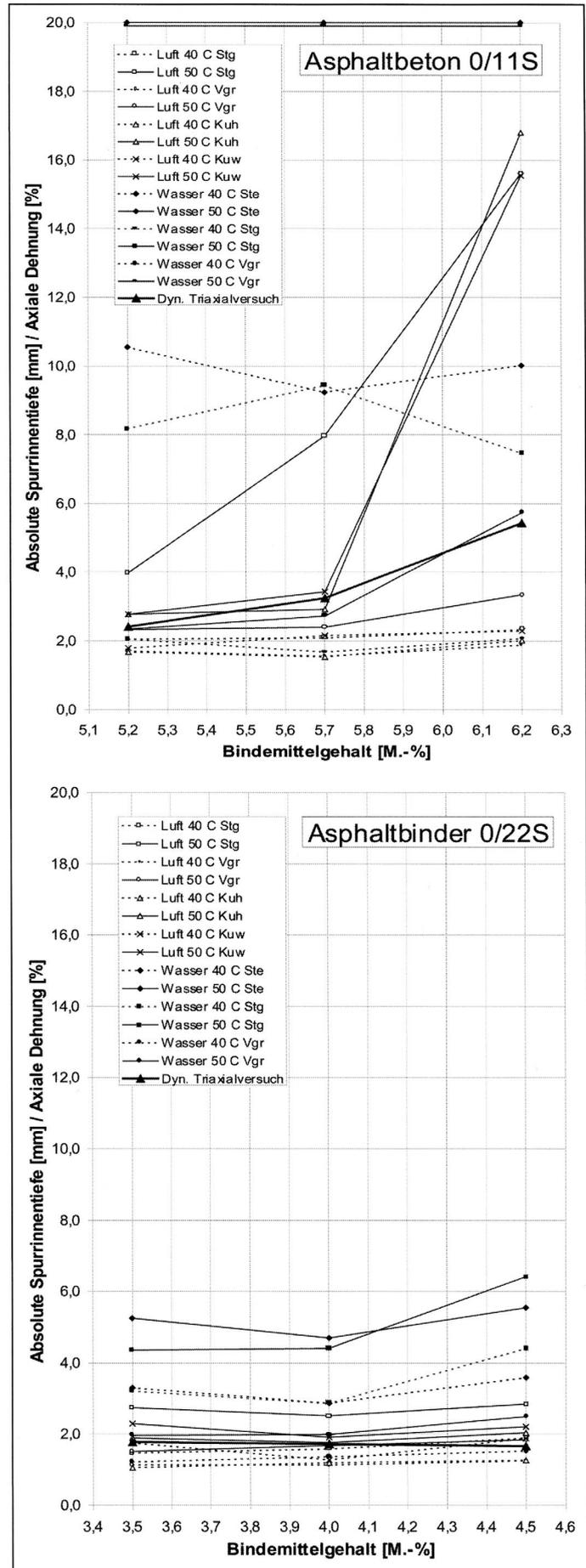
Um die Ergebnisse einem numerischen Vergleich zugänglich zu machen, wurden sie von ihren Einheiten "befreit". Dazu wurden die Ergebnisse relativiert, wobei der bei relativen Betrachtungen maßgebliche Bezugspunkt gleich 1 gesetzt wurde. Als Bezugspunkt wurde der aus der Regression erhaltene Erwartungswert am unteren Ende der untersuchten Bindemittelgehaltsspanne gewählt.

Für den Vergleich wurden praktisch die Steigungen der Regressionsgeraden herangezogen. Danach entspricht eine Prüfbedingung des Spurbildungsversuches dann den Vorgaben des Triaxialversuches, wenn ihre Steigung innerhalb des Konfidenzintervalls des Triaxialversuches liegt. Zur vereinfachten Behandlung der Daten wurden durch Transformation erhaltene "Steigungsfaktoren" untersucht. In der Tabelle 2 sind die daraus erhaltenen Übereinstimmungen grau hinterlegt.

Die vergleichende Betrachtung der Tabelle zeigt, dass die Anzahl der Übereinstimmungen mit zunehmender Steifigkeit des untersuchten Asphaltes in der Reihenfolge

- Asphaltbeton 0/11S
- Asphaltbinder 0/16
- Splittmastixasphalt 0/11S
- Asphaltbinder 0/16S
- Asphaltbinder 0/22S

zunimmt. Die markierten Übereinstimmungen liegen, und hier wieder insbesondere bei den weicheren Asphaltarten, nicht immer in den gleichen Feldern, was bedeutet, dass keine der variierten Prüfbedingungen oder der verschiedenen Auswertemodi bevorzugt wird. Abweichend davon zeigt die höhere Dichte an Übereinstimmungen bei den beiden S-Bindern, die beide als Asphaltgemische mit einem hohem Verformungswiderstand konzipiert und durch die Versuche letztlich auch bestätigt worden sind, dass für die Prüfung einer verformungsbeständigen Asphaltprobe nahezu jede Prüfbedingung geeignet



8: Absolute Spurrinntiefe nach 20.000 Überrollungen im Vergleich mit der Verformung im Triaxialversuch

ist. Dies bedeutet, dass auch die bisher geltenden Prüfbedingungen mit dem ebenen Stahlrad für verformungsresistente Gemische als noch durchaus geeignet anzusehen sind. Gleichzeitig lässt diese Tabelle aber auch erkennen, dass bei einer Asphaltart durch Übereinstimmung gekennzeichnete Verfahren oder Prüfbedingungen bei einer anderen Asphaltart nicht ebenfalls geeignet sein müssen. Diese Diskrepanz zwischen Eignung einer der Prüfbedingungen in einem Fall und Nichteignung in einem anderen Fall lässt den Schluss zu, dieses Prüfverfahren letztlich als nicht geeignet anzusehen. Dies gilt beispielsweise auch dann, wenn, wie im Falle der Prüfbedingung "Luft 50 °C Kuh", eine häufige Übereinstimmung bei den Bindermaterialien gepaart ist mit einer Nichteignung, die von einem besonders hohen Steigungswert gekennzeichnet wird, wie er vorliegend bei der Mischgutsorte Asphaltbeton 0/11S beobachtet worden ist.

Prozentuale Abweichung der Mittelwerte

Mit der relativen Änderung des Verformungswertes konnte zwar dargestellt werden, mit welchen Prüfbedingungen der Spurbildungsversuch die Vorgabe des dynamischen Triaxialversuches nachvollziehen konnte, eine Aussage über die Qualität der Annäherung der beiden Ergebnisse konnte aber nicht getroffen werden.

Dazu wurden die mittleren Steigungswerte direkt miteinander verglichen. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse des Vergleiches der mittleren Steigungswerte von Spurbildungsversuchen und Triaxialversuchen zusammengestellt. Die in Prozent angegebenen Zahlenwerte wurden mit Hilfe einer Graustufung in vier Qualitätskategorien unterteilt. Auf Grund des gewählten Algorithmus bedeutet der Wert 0,0 die vollständige Übereinstimmung.

Generell wird auch in Tabelle 3 die grundsätzliche Feststellung des Abschnittes "Relative Änderung..", wonach mit zunehmender Steifigkeit des Asphalttes eine bessere Übereinstimmung zwischen den gewählten Spurbildungsversuchen und dem Triaxialversuch besteht, bestätigt.

Die beiden verformungsbeständigen Bindermaterialien weisen daher eine hohe Anzahl an farblichen Markierungen auf. Die Gründe dürften in der Kombination einer relativ mörtelarmen Sieblinie mit dem Einsatz des höher-viskosen polymertemodifizierten Bindemittels zu suchen sein, dessen höhere Klebkraft zudem Stripping-Effekte verhindert. Die Ergebnisse dieser Versuche führen daher zwanghaft zu einer hohen Übereinstimmungsrate mit den ebenfalls niedrigen und sich vom gewählten Bindemittelgehalt als unabhängig erweisenden Verformungswerten im Triaxialversuch.

Eine hohe Zahl an Markierungen weisen auch die bei einer Prüftemperatur von 40 °C durchgeführten Spurbildungsversuche an den "weicheren" Asphaltmischungen auf. Als Ursache ist hier das bei einer Prüftemperatur von 40 °C die Einflussgrößen nicht ausreichend differenzierende niedrige Verformungsniveau zu vermuten.

Dies führt konsequenter Weise zu der Folgerung, die Ergebnisse der beiden S-Binder, deren Übereinstimmung mit dem Triaxialversuch quasi trivial ist, sowie der bei 40 °C durchgeführten Spurbildungsversuche nicht mehr in die weitere Betrachtung einzubeziehen. Die Prüfbedingung "40 °C" führt zu einer nicht ausreichenden Differenzierung, die aber im Sinne des Forschungszieles und der praxisdienlichen Aussage des Versuchsergebnisses angestrebt werden sollte. Die Elimination hat zum Ergebnis, dass diese Versuchsbedingungen auf Grund ihres hohen "Gewichtes" die wünschenswerte Differenzierung derjenigen Prüfbedingungen nicht mehr erschweren, die auch

Tab. 2: Zusammenstellung der „Steigungswerte“ zur Beschreibung der relativen Änderungen der Verformungsgrößen [%]

MG	Prüfbedingungen	Luft 40° C Stg	Luft 50° C Stg	Luft 40° C Vgr	Luft 50° C Vgr	Luft 40° C Kuh	Luft 50° C Kuh	Luft 40° C Kuw	Luft 50° C Kuw	Wasser 40° C Ste	Wasser 50° C Ste	Wasser 40° C Stg	Wasser 50° C Stg	Wasser 40° C Vgr	Wasser 50° C Vgr
AB 0/11 S	abs. Tiefe 10.000 Ü	109,6	227,2	108,8	139,0	111,4	367,5	123,6	278,2	90,4		113,3		99,4	242,8
	abs. Tiefe 20.000 Ü	113,9	446,8	110,1	146,0	121,6	3033,1	127,4	1584,0	94,8		91,9		101,0	278,4
	rel. Tiefe 10.000 Ü	109,5	229,4	108,2	140,1	113,2	366,6	125,1	279,2	91,2		113,3		101,3	244,0
	rel. Tiefe 20.000 Ü	113,9	452,6	109,5	147,1	123,6	3005,8	129,1	1603,2	95,8		91,8		103,0	280,0
	Spurrate I	122,9	426,5	134,5	193,7	176,3	2129,1	133,5	910,8	88,2		127,0		118,3	424,9
	Spurrate II	146,8	1536,1	123,7	216,9	239,1		160,3		96,9		80,8		116,1	728,7
SMA 0/11 S	abs. Tiefe 10.000 Ü	104,2	190,6	147,6	218,9	169,6	177,6	128,2	98,7	118,9		106,2		114,7	121,8
	abs. Tiefe 20.000 Ü	112,0	196,8	152,5	232,6	181,4	201,8	128,2	110,5	109,4		116,2		116,8	123,0
	rel. Tiefe 10.000 Ü	104,7	193,2	143,8	219,5	171,9	180,1	132,3	95,5	122,1		108,1		112,1	125,0
	rel. Tiefe 20.000 Ü	112,7	199,5	148,6	233,3	183,9	204,9	132,2	106,9	112,2		118,1		114,1	126,2
	Spurrate I	130,1	277,8	189,0	547,9	531,6	269,3	147,1	139,5	134,5		107,6		125,9	179,9
	Spurrate II	190,9	218,6	227,3	518,4	364,2	581,5	127,8	242,9	96,4		132,7		142,6	134,4
ABI 0/16	abs. Tiefe 10.000 Ü	104,2	60,8	52,4	136,5	26,8	160,8	123,2	122,1	70,2		165,0	604,9	63,5	111,5
	abs. Tiefe 20.000 Ü	96,8	75,9	54,4	134,7	32,5	190,1	123,5	120,7	26,3		250,0		66,4	113,3
	rel. Tiefe 10.000 Ü	102,9	63,0	52,8	138,6	27,3	163,7	124,3	120,1	73,6		172,5	615,3	63,9	111,5
	rel. Tiefe 20.000 Ü	95,7	78,4	54,9	136,8	33,0	193,4	124,6	118,7	28,8		259,9		66,8	113,3
	Spurrate I	68,4	74,4	58,2	126,1	102,4	205,4	149,4	134,7	54,9		248,5	1043,0	97,9	131,0
	Spurrate II	54,7	151,1	73,7	120,4	117,6	350,0	127,6	110,8			419,2		90,7	128,6
ABI 0/16 S	abs. Tiefe 10.000 Ü	67,7	67,1	107,6	116,4	43,7	136,0	158,2	88,3	101,6	114,2	111,4	145,7	81,3	72,8
	abs. Tiefe 20.000 Ü	64,9	72,9	104,2	110,8	40,0	130,0	159,1	93,2	105,4	151,3	117,5	156,4	84,2	71,3
	rel. Tiefe 10.000 Ü	70,4	69,9	109,4	116,9	42,8	125,4	149,3	85,6	101,9	115,6	113,1	141,3	81,7	72,5
	rel. Tiefe 20.000 Ü	67,5	75,8	105,9	111,3	39,0	120,0	150,2	90,3	105,8	153,2	119,3	151,6	84,6	71,0
	Spurrate I	33,3	102,9	90,0	74,1	15,7	103,7	265,5	132,1	89,1	150,6	100,0	151,4	111,4	84,9
	Spurrate II	46,1	124,1	77,1	64,1	7,0	91,1	171,4	153,4	131,4	326,3	157,4	185,7	119,8	55,8
ABI 0/22 S	abs. Tiefe 10.000 Ü	121,5	106,5	109,9	119,6	115,1	112,8	105,5	94,6	107,9	110,0	126,3	121,9	124,4	129,0
	abs. Tiefe 20.000 Ü	129,3	104,4	110,8	121,5	119,9	108,5	108,3	96,3	109,3	105,9	141,5	150,7	125,7	128,7
	rel. Tiefe 10.000 Ü	123,4	107,3	111,4	120,7	116,6	116,2	104,4	96,7	109,3	111,5	126,0	125,2	127,9	132,1
	rel. Tiefe 20.000 Ü	131,3	105,1	112,4	122,4	121,4	111,8	110,3	98,4	110,7	107,2	141,2	154,8	129,2	131,8
	Spurrate I	162,3	92,3	104,2	139,6	137,4	98,1	109,2	119,3	116,7	87,4	152,9	113,2	144,6	135,3
	Spurrate II	206,3	92,5	116,9	137,5	154,5	82,6	148,4	111,2	117,6	89,8	212,6	300,5	137,2	125,5

Legende:

Wert innerhalb der Vorgaben-Spanne "Triaxialversuch"

Versuch mit gewähltem Berechnungsschema nicht auswertbar

Versuch vorzeitig abgebrochen (Stripping und Komzerstörung)

Tab. 3: Prozentuale Abweichung der mittleren "Steigungswerte" von Spurbildungsversuchen und Triaxialversuch [%]

MG	Prüfbedingung	Luft 40°C Stg	Luft 50°C Stg	Luft 40°C Vgr	Luft 50°C Vgr	Luft 40°C Kuh	Luft 50°C Kuh	Luft 40°C Kuw	Luft 50°C Kuw	Wasser 40°C Ste	Wasser 50°C Ste	Wasser 40°C Stg	Wasser 50°C Stg	Wasser 40°C Vgr	Wasser 50°C Vgr
AB 0/11 S	Abs. Tiefe 10.000 Ü	53,9	4,4	54,3	41,6	53,1	54,6	48,0	17,0	62,0		52,4		58,2	2,1
	Abs. Tiefe 20.000 Ü	52,1	87,9	53,7	38,6	48,9	1175,5	46,4	566,1	60,1		61,4		57,5	17,1
	Rel. Tiefe 10.000 Ü	53,9	3,8	54,5	41,1	52,4	54,2	47,4	17,4	61,6		52,4		57,4	2,6
	Rel. Tiefe 20.000 Ü	52,1	90,3	53,9	38,1	48,0	1164,0	45,7	574,2	59,7		61,4		56,7	17,7
	Spurrate I	48,3	79,4	43,4	18,6	25,9	795,3	43,9	283,0	62,9		46,6		50,2	78,7
	Spurrate II	38,3	546,0	48,0	8,8	0,5		32,6		59,3		66,0		51,2	206,5
S M A 0/11	Abs. Tiefe 10.000 Ü	27,1	33,5	3,3	53,3	18,8	24,4	10,2	30,9	16,7		25,6		19,6	14,7
	Abs. Tiefe 20.000 Ü	21,5	37,9	6,8	62,9	27,1	41,3	10,3	22,6	23,4		18,6		18,2	13,9
	Rel. Tiefe 10.000 Ü	26,7	35,3	0,7	53,7	20,4	26,1	7,3	33,1	14,5		24,3		21,5	12,5
	Rel. Tiefe 20.000 Ü	21,1	39,7	4,1	63,4	28,8	43,5	7,4	25,1	21,4		17,3		20,1	11,6
	Spurrate I	8,9	94,6	32,4	283,7	272,3	88,6	3,0	2,3	5,8		24,7		11,8	26,0
	Spurrate II	33,7	53,1	59,2	263,0	155,0	307,2	10,5	70,1	32,5		7,1		0,2	5,9
AB 0/16 S	Abs. Tiefe 10.000 Ü	36,9	63,2	68,3	17,4	83,8	2,6	25,4	26,1	57,5		0,1	266,2	61,5	32,5
	Abs. Tiefe 20.000 Ü	41,4	54,1	67,1	18,5	80,3	15,1	25,2	26,9	84,1		51,4		59,8	31,4
	Rel. Tiefe 10.000 Ü	37,7	61,8	68,0	16,1	83,5	0,3	24,7	27,3	55,4		4,4	272,5	61,3	32,5
	Rel. Tiefe 20.000 Ü	42,1	52,6	66,8	17,2	80,0	17,1	24,5	28,2	82,6		57,3		59,6	31,4
	Spurrate I	58,6	55,0	64,7	23,7	38,0	24,3	9,6	18,5	66,8		50,4	531,5	40,7	20,7
	Spurrate II	66,9	8,5	55,4	27,1	28,8	111,9	22,8	32,9			153,8		45,1	22,2
AB 0/16 S	Abs. Tiefe 10.000 Ü	35,6	36,2	2,3	10,7	58,4	29,3	50,4	16,0	3,4	8,6	5,9	38,5	22,7	30,8
	Abs. Tiefe 20.000 Ü	38,3	30,7	0,9	5,4	62,0	23,6	51,3	11,4	0,2	43,9	11,7	48,7	19,9	32,2
	Rel. Tiefe 10.000 Ü	33,1	33,5	4,0	11,1	59,3	19,2	42,0	18,6	3,1	9,9	7,5	34,4	22,3	31,1
	Rel. Tiefe 20.000 Ü	35,8	27,9	0,7	5,8	62,9	14,1	42,8	14,1	0,6	45,7	13,4	44,2	19,5	32,5
	Spurrate I	68,3	2,1	14,4	29,6	85,1	1,4	152,4	25,6	15,2	43,2	4,9	44,0	5,9	19,3
	Spurrate II	56,2	18,0	26,7	39,1	93,4	13,4	63,0	45,9	24,9	210,2	49,7	76,6	13,9	46,9
AB 0/22 S	Abs. Tiefe 10.000 Ü	29,4	13,4	17,0	27,3	22,5	20,1	12,3	0,7	14,9	17,1	34,4	29,7	32,4	37,4
	Abs. Tiefe 20.000 Ü	37,7	11,1	18,0	29,3	27,6	15,6	15,3	2,5	16,4	12,7	50,7	60,4	33,8	37,1
	Rel. Tiefe 10.000 Ü	31,3	14,2	18,6	28,5	24,1	23,7	14,4	2,9	16,3	18,7	34,1	33,3	36,1	40,7
	Rel. Tiefe 20.000 Ü	39,8	11,9	19,7	30,6	29,2	19,0	17,4	4,8	17,9	14,2	50,3	64,8	37,5	40,4
	Spurrate I	72,8	1,7	11,0	48,7	46,3	4,5	16,2	27,0	24,3	6,9	62,8	20,5	53,9	44,0
	Spurrate II	119,7	1,5	24,5	46,4	64,5	12,0	58,0	18,3	25,2	4,4	126,3	219,9	46,1	33,6

Legende:
 $0 \leq x < 10$
 $10 \leq x < 25$
 $25 \leq x < 50$
 $50 \leq x$
 Versuch mit dem gewählten Berechnungsschema nicht auswertbar
 Leerfeld Versuch vorzeitig abgebrochen (Stripping und Kornerstörung)

bei den sensibleren, d. h. weicheren Asphaltgemischen, noch eine gute Übereinstimmung mit den Triaxialversuch-Vorgaben erreichen können.

3.4.5 Rangfolgetests

Die Annäherung der mittleren Steigungswerte der Spurbildungsversuche an die Vorgaben des Triaxialversuchs wurde durch die Vergabe von Rangziffern und die Aufstellung von "Ranglisten" qualitativ sortiert. Die Tabelle 4 zeigt die Rangliste für den Vergleich mit der axialen Dehnung im Triaxialversuch.

Die Ranglisten zeigen einerseits die Qualität der Annäherung eines Spurbildungsverfahrens an den Triaxialversuch und andererseits ggf. vorhandene Unterschiede zwischen den verschiedenen Auswertemethoden. Letztere wurden mit dem Spearman'schen Rang-Korrelationskoeffizienten untersucht.

Dieser Test dient zum Vergleich der Signifikanz von Reihungen, wie sie von den vorliegenden Ranglisten gezeigt werden. Aus dem Spearman'schen Rang-Korrelations-Test ergeben sich im Vergleich der Spurbildungsverfahren mit dem Triaxialversuch die in Tabelle 5 aufgeführten Koeffizienten. Die markierten Werte überschreiten den Schwellenwert. Die so gekennzeichneten Rangfolgen sind gleich.

Die Ranglisten

- absolute Spurrinnentiefe nach 10.000 Ü
 - relative Spurrinnentiefe nach 10.000 Ü
 - relative Spurrinnentiefe nach 20.000 Ü
 - Spurrate I
- sind somit mit der Rangliste
- absolute Spurrinnentiefe nach 20.000 Ü
- identisch.

Tab. 5: Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizienten für den Vergleich der Ranglisten

r_s -Werte / r_{sB} -Werte ($r_s^* = 0,786$)	Abs. Tiefe 10.000 Ü	Abs. Tiefe 20.000 Ü	Rel. Tiefe 10.000 Ü	Rel. Tiefe 20.000 Ü	Spurrate I	Spurrate II
Abs. Tiefe 10.000 Ü		0,835	1,000	0,835	0,798	0,655
Abs. Tiefe 20.000 Ü	0,835		0,835	1,000	0,954	0,771
Rel. Tiefe 10.000 Ü	1,000	0,835		0,835	0,798	0,655
Rel. Tiefe 20.000 Ü	0,835	1,000	0,835		0,954	0,771
Spurrate I	0,798	0,954	0,798	0,954		0,752
Spurrate II	0,655	0,771	0,655	0,771	0,752	

4. Schlussfolgerungen

Die Beobachtungen bei der Durchführung der Versuche und die Auswertungen der Ergebnisse haben gezeigt, dass nicht alle untersuchten Prüfbedingungen die Vorgaben der Triaxialversuche einhalten konnten.

Als wesentliche Merkmale wurden dabei erkannt:

- unzureichende Differenzierung des Bindemittelgehalts-Einflusses bei Prüftemperaturen von 40 °C
- gefügestörende Einflüsse der Kombination Wasser und Stahlrad
- ergebnisbeeinflussende Anhaftungen bei der Prüfung in Luft mit den Kunststoff- und den gerundeten Stahlrädern.

Tab. 4: Ranglisten der untersuchten Spurbildungsvarianten im Vergleich mit dem Triaxialversuch

Absolute Spurrinntiefe nach 10.000 Ü			Relative Spurrinntiefe nach 10.000 Ü			Spurrate I		
Rang	Prüfbedingung	Rangsumme	Rang	Prüfbedingung	Rangsumme	Rang	Prüfbedingung	Rangsumme
1	Wasser 50°C Vgr	6	1	Wasser 50°C Vgr	6	1,5	Luft 50°C Kuw	6
2	Luft 50°C Kuh	8	2	Luft 50°C Kuh	8	1,5	Wasser 50°C Vgr	6
3	Luft 50°C Kuw	9	3	Luft 50°C Kuw	9	3	Luft 50°C Vgr	9
4,5	Luft 50°C Stg	11	4,5	Luft 50°C Stg	11	4,5	Luft 50°C Stg	12
4,5	Luft 50°C Vgr	11	4,5	Luft 50°C Vgr	11	4,5	Luft 50°C Kuh	12
6	Wasser 50°C Stg	19	6	Wasser 50°C Stg	19	6	Wasser 50°C Stg	19
7	Wasser 50°C Ste	20	7	Wasser 50°C Ste	20	7	Wasser 50°C Ste	20

Absolute Spurrinntiefe nach 20.000 Ü			Relative Spurrinntiefe nach 20.000 Ü			Spurrate II		
Rang	Prüfbedingung	Rangsumme	Rang	Prüfbedingung	Rangsumme	Rang	Prüfbedingung	Rangsumme
1	Wasser 50°C Vgr	6	1	Wasser 50°C Vgr	6	1	Wasser 50°C Vgr	5
2,5	Luft 50°C Vgr	9	2,5	Luft 50°C Vgr	9	2	Luft 50°C Stg	6
2,5	Luft 50°C Kuw	9	2,5	Luft 50°C Kuw	9	3	Luft 50°C Vgr	8
4	Luft 50°C Kuh	10	4	Luft 50°C Kuh	10	4	Luft 50°C Kuw	11,5
5	Luft 50°C Stg	11	5	Luft 50°C Stg	11	5	Luft 50°C Kuh	14,5
6,5	Wasser 50°C Ste	19,5	6,5	Wasser 50°C Ste	19,5	6,5	Wasser 50°C Ste	19,5
6,5	Wasser 50°C Stg	19,5	6,5	Wasser 50°C Stg	19,5	6,5	Wasser 50°C Stg	19,5

Die bei den genannten Bedingungen erhaltenen Ergebnisse führten bereits augenscheinlich zu Auffälligkeiten bei der grafischen Darstellung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt der untersuchten Mischgutproben. Die schon während der Versuchsdurchführung erkennbaren Ursachen derartiger Phänomene wären eine ausreichende Begründung für den Ausschluss dieser Verfahren gewesen. Die weiterführenden numerischen Auswertungen haben diese Auffälligkeiten auch zahlenmäßig bestätigt. Letzlich blieben lediglich die Spurbildungsversuche unter Einsatz des Vollgummirades davon unbehelligt. Folgerichtig wurden daher die beiden alternativen Versuche mit dem Vollgummirad an den Spitzen der aufgestellten Ranglisten wieder gefunden.

Als Ergebnis der Arbeit im Hinblick auf das Forschungsziel ist daher festzuhalten, dass sich vorliegend die Prüfbedingungen

**Wasser 50 °C Vollgummirad
Luft 50 °C Vollgummirad**

als diejenigen erwiesen haben, mit denen die Vorgaben des Triaxialversuches am besten nachvollzogen werden können. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass auch mit den beiden genannten Prüfbedingungen im Spurbildungsversuch eine praxisnahe Beurteilung der Verformungseigenschaften von Asphaltgrundsätzlich möglich ist. Dies gilt insbesondere für die Differenzierung der Auswirkung veränderlicher Bindemittelgehalte auf die Verformungseigenschaften von Asphaltgemischen.

Eine gleichartige Differenzierung zwischen verschiedenen Asphaltgemischen war bei den untersuchten Asphaltbindern nachzuweisen. Eine Erweiterung dieser Feststellung auf andere Bindergemische oder andere Asphaltarten erscheint vorerst noch nicht ratsam. Dies zu untersuchen, bleibt weiteren Forschungsarbeiten vorbehalten, bei denen auch die Möglichkeit einer wünschenswert größeren Spreizung der Versuchsergebnisse durch Erhöhung der Prüftemperatur untersucht werden könnte. Des Weiteren sollten auch die Randbedingungen des Triaxialversuches nochmals kritisch beleuchtet werden. Die aus dem Entwurf der Euro-Norm abgeleiteten alternativen Auswertungsmethoden haben sich bezüglich der absoluten und

der relativen Spurrinntiefe, sowie bezüglich der Betrachtung nach 10 000 und 20 000 Überrollungen als gleichwertig erwiesen. Daraus können verschiedene Schlüsse gezogen werden:

- Die Versuchsdauer könnte aus ökonomischen Gründen von 20 000 auf 10 000 Überrollungen reduziert werden.
- Eine gesonderte Auswertung der relativen Spurrinntiefe ist vor dem Hintergrund der bisherigen Praxis in Deutschland, welche für jede Asphaltart eine bestimmte Probendicke vorsieht, nicht erforderlich, kann aber aus Gründen der internationalen Vergleichbarkeit akzeptiert werden.

Die Spurrate I führt zu dem gleichen Ergebnis wie die konventionelle Betrachtung der Spurrinntiefe. Auf die Ermittlung der Spurrate I kann daher verzichtet werden. Dennoch zeigen die Prüfungen mit dem Vollgummirad auch hierbei die beste Übereinstimmung mit dem Triaxialversuch, wenn man die Prüfbedingung "Stahlrad in Luft" wegen der Anhaftungseffekte eliminiert. Die Spurrate II führt dagegen zu einer völlig neuen Aussage, weil sie nur den zweiten Teil des Versuchs ohne Berücksichtigung der "Vorgeschichte" der ersten Versuchshälfte bewertet. Die Rangliste "Spurrate II" wird nach Elimination der adhäsionssensiblen Prüfbedingung "Luft 50 °C Stg" ebenfalls von den beiden Prüfbedingungen mit Vollgummirad angeführt. Mit der Benennung der Prüfbedingung "Vollgummirad 50 °C Wasser oder Luft" wurde ein Forschungsergebnis erhalten, das in mehrfacher Hinsicht befriedigt:

- Die Prüfbedingung "Vollgummirad in Wasser 50 °C" hat sich im Rahmen einer in Frankreich durchgeführten Studie den beiden anderen im Entwurf der Euronorm aufgeführten Gerätevarianten als gleichwertig erwiesen und deshalb Eingang in den Normentwurf gefunden. Der Normentwurf muss also diesbezüglich nicht geändert werden. In Ergänzung des Entwurfes wird jedoch angeregt, alternativ die Prüfung im Luftbad aufzunehmen und als Auswertungsalternative die Bestimmung der absoluten Spurrinntiefe, wie sie der TPA der FGSV [8] formuliert ist, zuzulassen.
- Mit der Prüfbedingung "Vollgummirad bei 50°C" steht ein Spurbildungsverfahren zur Verfügung, das mutmaßlich eine wesentlich bessere Reproduzierbarkeit aufweisen dürfte als

die TPA-Prüfbedingung "Ebenes Stahlrad in Wasser 50 °C". Eine gute Reproduzierbarkeit ist Voraussetzung für eine differenzierte Betrachtung von Versuchsergebnissen mit dem Ziel einer qualitativen Zuordnung.

Als weniger befriedigend erscheint – ungeachtet des Umstandes der guten Vergleichbarkeit mit dem Triaxialversuch – die relativ geringe Differenzierung zwischen den untersuchten Asphaltarten. Dies bestätigt auch die Auswertung der Triaxialversuche der TU Braunschweig. Eine derartig niedrige Differenzierung erlaubt selbst bei einer Bestätigung der offensichtlich guten Reproduzierbarkeit keine sichere Trennung von Asphalten mit hohem und niedrigem Widerstand gegen Verformungen. Es bliebe zu prüfen, ob bei einer höheren Prüftemperatur eine Verbesserung der Spreizung erreicht werden könnte. Dies erforderte die Durchführung einer Folgeforschungsarbeit, die unter Beteiligung mehrerer Laboratorien gleichzeitig auch für die Ermittlung der Präzision des Prüfverfahrens dienen könnte.

Die Spurbildungsergebnisse an den beiden S-Bindern haben darüber hinaus gezeigt, dass fast alle eingesetzten Prüfverfahren, darunter auch das TPA-Verfahren, für die Prüfung und Bewertung von Asphaltgemischen mit einem hohen Widerstand gegen Verformung gleichermaßen geeignet sind. Dies bestätigt die bisherige Sprachregelung, wonach der in der TPA beschriebene Spurbildungsversuch geeignete und nicht geeignete Materialien unterscheiden kann, nur insofern, als in jedem Fall geeignete Asphalte erkannt werden können. In Bezug auf das Verhalten in der Praxis liegt diese Aussage zwar auf der "sicheren" Seite, schließt aber eine Fehlbeurteilung anderer geeigneter Gemische nicht aus. Aus wirtschaftlichen Erwägungen, zur Vermeidung der Bevorzugung "gut prüfbarer" Zusammensetzungen und zur Schonung von Ressourcen können die derzeitige TPA-Regelung und die daraus folgenden Anforderungen nur noch als Übergangslösungen angesehen werden, die spätestens bis zur Einführung der Euronorm DIN EN 12697-22 befristet sein sollte. Bis dahin sollte auch die aus den vorliegenden Ergebnissen ableitbare Folgeforschungsarbeit abgeschlossen sein. □