

Neues zur Wasserempfindlichkeits-Prüfung von HMF in der Schweiz – Ergebnisse des FA 27/98

Sylvia Gonzalez Lakehal, Dipl.-Ing., Dr. Manfred N. Partl, Dipl.-Ing. ETH, EMPA, Abteilung Strassenbau/Abdichtungen, Dübendorf

Kurzfassung Deutsch

Die Schweizer Norm für Heissmischfundationsschichten SN 640 452c wurde 1997 von der VSS revidiert. Eine der massgebenden Änderungen war die Einführung des Spaltzugversuchs, welcher den Einfluss von Wasser auf die Festigkeitseigenschaften überprüft. Erste konkrete Erfahrungen bei der Umsetzung der neuen Version der Norm zeigten, dass bezüglich dieser Prüfung noch zusätzliche Abklärungen erforderlich waren. In diesem Zusammenhang wurde die EMPA vom UVEK beauftragt, offene Detailfragen abzuklären und eine genaue, anwenderfreundliche Prüfvorschrift vorzuschlagen.

Hauptelemente der vorgeschlagenen Prüfvorschrift bilden die Durchführung der Prüfung ausschliesslich an Marshall Prüfkörpern mit dem Soll-Hohlraumgehalt (fixe Schlagzahl), die Sättigung aller Prüfkörper mit dem gleichen Druck, die Unterteilung der Prüfkörper in zwei Serien ("trocken", "nass") anhand des Hohlraumgehaltes im Ausmessverfahren sowie die Verdoppelung der Prüfkörper. Die neue Prüfprozedur zeichnet sich aus durch Klarheit, Einfachheit und schnelle Durchführbarkeit. Sie führt ausserdem zu Ergebnissen mit geringeren Messunsicherheiten. Dadurch ist letztlich sowohl den Prüflabors als auch den Mischgutherstellern und Bauherren gedient.

Kurzfassung Französisch

En 1997 la VSS a procédé à une révision de la norme suisse sur les couches de fondations à chaud SN 640 452c. Une des modifications les plus importantes consiste en l'introduction de l'essai de traction indirecte, qui sert à contrôler l'influence de l'eau sur les caractéristiques mécaniques. Les premières expériences pratiques de cette nouvelle version de la norme ont montré qu'il était nécessaire de procéder à des éclaircissements supplémentaires quant à cet essai. A cette fin, l'EMPA a été chargée par le DETEC d'éclaircir certains points et de proposer une procédure d'essai à la fois précise et commode.

Les points essentiels de la nouvelle procédure d'essai proposée sont l'exécution de l'essai exclusivement avec des éprouvettes Marshall à la teneur en vides nominale (nombre de coups fixe), la saturation de toutes les éprouvettes à la même pression, la sélection des éprouvettes en deux séries ("sec" et "mouillé") à l'aide de la teneur en vides déterminée par les mesures géométriques, et le doublement du nombre d'éprouvettes. Cette nouvelle procédure d'essai se distingue par sa clarté, sa simplicité et sa rapidité d'exécution. De plus elle conduit à des résultats présentant des incertitudes de mesure plus faibles; ceci va finalement dans le sens des intérêts tant des laboratoires d'essai que des producteurs d'enrobés et des maîtres d'ouvrage.

Einleitung

Mit den wachsenden Anforderungen an Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Asphaltbelägen kommt auch dem Einfluss von Wasser auf deren mechanische Eigenschaften immer grössere Bedeutung zu. Ende der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts erregten entsprechende Belagsschäden in den USA aber auch in Europa breite – wengleich länder- und klimaspezifisch unterschiedliche – Aufmerksamkeit. Bis heute hat diese Problematik aufgrund der praktischen Erfahrungen und trotz erheblicher partieller Anstrengungen nichts an ihrer Aktualität eingebüsst. In der Schweiz wurde dem Aspekt der Wasserempfindlichkeit im Zusammenhang mit der neuen Norm für Heissmischfundationsschichten SN 640 452c [12] erstmalig explizit Rechnung getragen. In

dieser Norm wurde die HMF in Richtung HMT aufgewertet, wobei dieser Schicht aufgrund der bisherigen positiven Erfahrungen in der Praxis eine vermehrt tragende Funktion zuerkannt und ihr Widerstandspotential gegen klimatisch und hydrologisch bedingte Beanspruchungen stärker als bisher gewichtet wurde [3].

Der Einfluss von Wasser auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltbelägen äussert sich in einer Vielzahl von Schäden, wie Rissbildung und Materialverlust samt damit verbundener Spurrinnenbildung, welche die Performance und Lebensdauer von Asphaltbelägen bedeutend verringern [1]. Oft werden wasserinduzierte Schäden durch Frostwirkung verstärkt. Sowohl Mikrorisse als auch ungenügende Haftung zwischen Bindemittel und Zuschlagkörnern wirken sich negativ auf den Zusammenhalt des verdichteten Mischguts aus und verringern insbesondere dessen Fähigkeit, innere Zugspannungen aufzunehmen. Eine solche mechanische Schwächung fördert das Eindringen von Wasser und kann durch gleichzeitige Bildung neuer Risse und Trennflächen zusätzlich verstärkt werden.

Die Methoden zur Prüfung der Wasserempfindlichkeit sind vielfältig. Einige Prüfungen verwenden unverdichtetes Mischgut, während andere im Labor hergestellte Prüfkörper oder Bohrkerne erfordern. Im ersten Fall wird meistens der Bindemittelablöseffekt (Stripping) visuell untersucht. Im zweiten Fall werden die Prüfkörper konditioniert und zusätzlich einem Steifigkeits- oder Festigkeitstest unterzogen. Die Prüfkörper werden meist nach dem Verhältnis zwischen konditionierten und unkonditionierten Eigenschaften beurteilt. Leider gibt es heute noch keine weltweit verwendete und anerkannte Methode, da eine einheitliche Identifizierung wasserempfindlicher Mischungen fehlt und die Übereinstimmung zwischen Labor und Praxis noch wenig zu befriedigen vermag.

Beim Überarbeiten der Schweizer Norm für Heissmischfundationsschichten SN 640 452b [11] im Jahre 1997 wurde schnell deutlich, dass im internationalen Umfeld die dort vorhandene Beurteilung des Widerstandes gegenüber Wassereinflüssen mittels Marshallprüfung überholt und unzureichend ist, zumal diese Prüfung dem für die Wasserempfindlichkeit kritischen Beanspruchungszustand im Belag kaum gebührend Rechnung trägt.

In der neuen Version der Norm SN 640 452c [12] wird die Wasserempfindlichkeitsprüfung anhand des Spaltzugversuchs vor und nach Wasserlagerung durchgeführt. Die Prüfung beruht auf dem modifizierten Lottman Test wie er in den amerikanischen Normen ASTM D 4867 [9] und AASHTO T283 [8] beschrieben und von SHRP¹ nach verschiedenen Studien als Standardprüfung vorgeschlagen wurde. Auch im europäischen Raum ist der Spaltzugversuch bekannt; in Deutschland beispielsweise schon seit über 60 Jahren. Die Prüfung ist aber bis heute nicht im deutschen Vorschriftenwerk verankert worden [6]. In Zukunft wird voraussichtlich eine europäische Norm für die Wasserempfindlichkeit herausgegeben werden, welche auch den Spaltzugversuch verwendet.

Die Vorgaben in der SN 640 452c für die neue Prüfung orientieren sich weitgehend an der ASTM D 4867-92 [9]. Die amerikanische Norm ist aber nicht für HMF konzipiert, da in den USA vor allem die Wasserempfindlichkeit von Deckbelägen im Vordergrund steht. Einige der dortigen Anforderungen, wie beispielsweise der Hohlraumgehalt, wurden in der Schweizer Norm abgeändert. Ein zweistufiges Verfahren wurde vorgeschrieben, welches die Durchführung der Prüfung bei zwei verschiedenen Hohlraumgehalten fordert:

- Serie a: mit dem Soll-Hohlraumgehalt (50 Marshall-Schläge)
- Serie b: mit dem höchstzulässigen Hohlraumgehalt, d. h. mit einem um 4 Vol.-% erhöhten Soll-Hohlraumgehalt (mit unbekannter Anzahl Marshall-Schläge)

Aufgrund der kurzfristigen Normenrevision war es nicht möglich, sich auf schweizerische Forschungsergebnisse an HMF Mischgut abzustützen und das neue Prüfverfahren vorher für das ganze Anwendungsspektrum rechtzeitig zu validieren. Erste konkrete Erfahrungen bei der Umsetzung der neuen Norm in die Praxis sowie dem an der EMPA 1998 durchgeführten

¹ Strategic Highway Research Programm

Praxisseminar zum Prüfverfahren [4] haben gezeigt, dass hinsichtlich dieser Prüfung noch zusätzliche Erfahrungen gesammelt werden müssen. Das zweistufige Verfahren erwies sich zum Beispiel als relativ aufwändig und zu wenig präzise in der Norm beschrieben.

Aus diesem Grunde wurde die Abteilung Strassenbau/Abdichtungen der EMPA im Rahmen der Strassenbauforschung des UVEK beauftragt, ein Forschungsprojekt durchzuführen mit dem Ziel eine präzise und gut durchführbare Prüfvorschrift vorzuschlagen. Dafür sollte die Verdichtbarkeit und Wasserempfindlichkeit an Heissmischfundationsschichten mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt Marshall überprüft werden. Zusätzlich war eine statistische Auswertung durchzuführen.

Prüfprozedur nach SN 640 452c (aktuelle Version)

Bei der jetzigen Prüfung der Wasserempfindlichkeit werden zwei Serien aus je 6 Marshall Prüfkörpern (ϕ ca. 100 mm) hergestellt. Die erste Serie wird mit dem Soll-Hohlraumgehalt, die zweite mit einem um 4 Vol.-% erhöhten Hohlraumgehalt geprüft (siehe Tabelle 1). Beide werden in je zwei Teilsereien ("trocken" und "nass") mit ähnlichem Hohlraumgehalt aufgeteilt. Die erste Teilserei wird trocken geprüft. Vor dem Spaltzugversuch werden die Prüfkörper lediglich während 20 Minuten in einem Wasserbad bei 25°C konditioniert. Die Prüfkörper der Teilserei "nass" werden vorab gesättigt (55..80 Vol.-% Sättigung) und während 24 Stunden in einem 60°C Wasserbad gelagert. Danach werden sie während 60 Minuten in einem 25°C Wasserbad konditioniert.

Serie a: Soll-HM (50 Schläge)		Serie b: Soll-HM + 4 Vol.-% (X Schläge)	
Teilserei "trocken": 3 Prüfkörper	Teilserei "nass": 3 Prüfkörper	Teilserei "trocken": 3 Prüfkörper	Teilserei "nass": 3 Prüfkörper
-	Sättigung: 55..80 Vol.-% Lagerung: 24h bei 60°C	-	Sättigung: 55..80 Vol.-% Lagerung: 24h bei 60°C
Konditionierung: bei 25°C		Konditionierung: bei 25°C	
20 Min.	60 Min.	20 Min.	60 Min.
Spaltzug bei 25°C		Spaltzug bei 25°C	

Tabelle 1: Ablauf der Wasserempfindlichkeits-Prüfung gemäss SN 640 452c [12]
(HM: Hohlraumgehalt Marshall)

Bei allen Teilsereien ist nach der Konditionierung sofort die Spaltzug-Bruchkraft F_{max} zu bestimmen und die Spaltzugfestigkeit zu berechnen. Beim Spaltzugversuch wird der zylindrische Prüfkörper mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 ± 2 mm/min an diametral entgegengesetzten Stellen der Mantelfläche über einen Lasteinleitungsstreifen bis zum Bruch belastet (siehe Abbildung 1). Der über die Linienlast erzeugte Druck am oberen und unteren Scheitelpunkt bewirkt Zugspannungen im Innern des Prüfkörpers, so dass dieser beim Bruch in zwei Hälften zerfällt. Die Spaltzugfestigkeit S_t berechnet sich aus der beim Bruch erreichten doppelten Maximallast F_{max} und den geometrischen Kennwerten des Prüfkörpers (D: Durchmesser, h: Höhe)::

$$S_t = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (1)$$

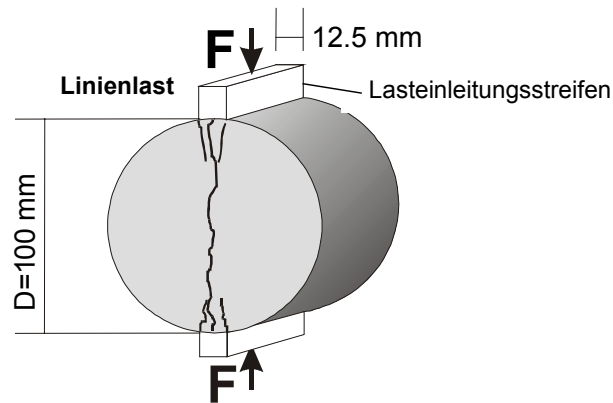


Abbildung 1: Prinzip des Spaltzugversuchs mit den in der EMPA verwendeten Abmessungen [7]

Als Anforderungswert dient das Verhältnis TSR (**T**ensile **S**trength **R**atio) der mittleren Spaltzugfestigkeiten vor und nach Wasserlagerung:

$$TSR = S_{tm}/S_{td} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Index t: tension=zug; Index m: moisture=feucht, Index d: dry=trocken

Die Anforderung an den TSR beträgt sowohl bei der SN 640 452c als auch bei der ASTM 4867 mindestens 80%.

Untersuchungen des FA 27/98

Im ersten Teil des Forschungsauftrages wurden Vorabklärungen zur experimentellen Durchführbarkeit der in SN 640 452c beschriebenen Prüfung der Festigkeit nach Wasserlagerung an einer HMF 22 gemacht. Aus den entsprechenden Ergebnissen und Erfahrungen wurde eine Prüfmethode für den Normvorschlag festgelegt und an 10 verschiedenen HMF-Mischgutsorten validiert. Mit den Ergebnissen wurde eine statistische Auswertung durchgeführt, welche u.a. zur Bestimmung der nötigen Anzahl Prüfkörper diente.

Vorabklärungen an einer HMF22

Für die Vorabklärungen zur experimentellen Durchführbarkeit der Prüfmethode wurden vier verschiedene Prüfkörper-Gruppen (je ca. 20 Prüfkörper) einer HMF 22 verwendet. Die Durchführbarkeit einzelner Arbeitsschritte sowie der gesamten Prüfung wurde verifiziert. Hauptelemente der Vorabklärungen waren

- die Verdichtbarkeit des Mischgutes mit einer unbekanntem Schlagzahl im Hinblick auf das Erreichen des für die Serie b notwendigen Hohlraumgehalts (HM-Soll + 4 Vol.-%)
- das Sättigen der Teilserie "nass" anhand eines unbekanntem Vakuums im Hinblick auf das Erreichen der geforderten Sättigung von 55...80 Vol.-% (inkl. Abklärungen hinsichtlich der Methode zur Sättigungsbestimmung und -berechnung)
- die Hohlraumgehalts-Bestimmungsmethode, welche einen bedeutenden Einfluss auf die Ermittlung von Verdichtbarkeit und Sättigungsgrades hat

Die Prüfprozedur wurde zusätzlich auf Zweckmässigkeit und Vollständigkeit bzw. Unstimmigkeit untersucht.

Die Vorabklärungen zeigten, dass das Prüfen der Wasserempfindlichkeit mit dem höchstzulässigen Hohlraumgehalt (Serie b) sehr aufwändig ist. Das Verdichten der Prüfkörper auf einen um 4 Vol.-% erhöhten Soll-Hohlraumgehalt mit einer vom Mischgutttyp abhängigen und somit zunächst unbekanntem Schlagzahl wird durch die starke Streuung des Hohlraumgehaltes und den Einfluss der verwendeten Rohdichtebestimmungs-Methode zu einer langwierigen Suche dieser Schlagzahl, die meist die Herstellung vieler Prüfkörper erfordert. Hinzu kommt, dass die Toleranz für die Erhöhung des Hohlraumgehaltes um 4

Vol.-% in der Norm [12] unklar ist und zu einer ungleichen oder unkorrekten Anwendung führen kann. Da die Beziehung Schlagzahl/Hohlraumgehalt und somit auch die für die Serie b notwendige Schlagzahl je nach Mischgut sehr unterschiedlich sein kann, werden verschiedene HMF unter ungleichen Bedingungen geprüft.

Da für die Berechnung des gesamten Hohlraumvolumens keine geeignete Rohdichte-Bestimmungsmethode vorlag, konnte der Sättigungsgrad der untersuchten HMF nur ungenau bestimmt werden. Anstatt der Anwendung eines vorab unbekanntes und je nach Mischgut unterschiedlichen Vakuums, welches zu einer ungenauen Einhaltung der Sättigungsgrenzen (55...80 Vol.-%) führen kann, wurde daher für alle Mischgutsorten die Applikation eines bestimmten Vakuums vorgeschlagen. Dabei sollte das Vakuum so festgesetzt werden, dass für die meisten Mischgutsorten ein Sättigungsgrad innerhalb der Normgrenzen erreicht wird ohne jedoch deren Einhaltung kontrollieren zu müssen. Aufgrund der Ergebnisse der HMF 22 dieser Vorabklärungen wurden erstmals 300 mbar absoluten Drucks (ca. 700 mbar Vakuum) vorgeschlagen. Da die Sättigungsberechnung entfällt, vereinfacht sich die Prozedur und alle HMF werden unter gleichen Bedingungen geprüft.

Zusätzlich zeigte sich, dass die Rohdichtebestimmungs-Methoden nach Norm [13] keine zufriedenstellende Berechnung des Hohlraumgehaltes sowohl bei der Suche der für die Serie b notwendigen Schlagzahl als auch bei der Berechnung des Sättigungsgrades und letztlich auch bei der Bildung der Teilsereien ("trocken" und "nass") erlauben [5], [2]. Vorgeschlagen wird die Bildung der Teilsereien anhand des schnell ermittelbaren und für den Drainasphalt [10] verwendeten Hohlraumgehaltes im Ausmessverfahren.

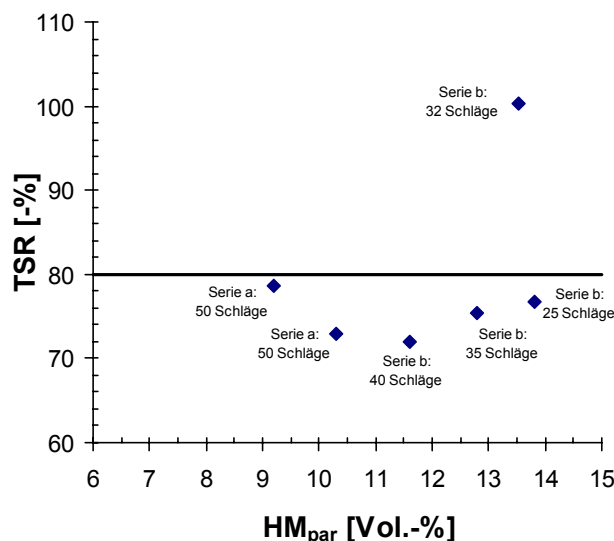


Abbildung 2: : Beziehung zwischen TSR und dem Hohlraumgehalt HM_{par} an paraffinierten Prüfkörpern für die in den Vorabklärungen untersuchten Serien a und b an der HMF22 (HM-Mittelwerte mind. 3 Prüfkörper)

Abbildung 2 zeigt die Beziehung zwischen TSR und dem Hohlraumgehalt an paraffinierten Prüfkörpern für die in den Vorabklärungen untersuchten Serien a und b an der HMF22. Alle fünf TSR-Werte liegen unterhalb der TSR-Grenze (80%), unabhängig davon, ob es sich um die Serie a oder b handelt. Einzige Ausnahme ist der TSR von 100%, der als Ausreisser betrachtet wird. Eine Abhängigkeit zwischen TSR und Hohlraumgehalt ist bei dieser HMF und der vorhandenen Hohlraumgehalts-Spannbreite nicht ersichtlich. Die Streuung des TSR-Wertes innerhalb der Serien des gleichen Typs (a oder b) ist gleich gross wie der maximale Ergebnisunterschied zwischen einer Serie a und einer Serie b.

Da die Durchführung der Wasserempfindlichkeits-Prüfung bei den Vorabklärungen mit einem erhöhten Hohlraumgehalt (Serie b) sehr aufwändig und letztlich keine zur Serie a unterschiedlichen Ergebnisse lieferte, wurde die Serie b in den nachstehenden Untersuchungen eliminiert. Um die Unsicherheit der TSR-Ergebnisse zu reduzieren, wurde

die Verdoppelung der Prüfkörperzahl der Serie a vorgeschlagen, d. h. jeweils 6 Prüfkörper pro Teilsreihe ("nass" und "trocken"). Durch die Aufhebung der Serie b bleibt die gesamte Prüfkörperzahl aber gleich.

Untersuchung zehn verschiedener HMF

Die aus den Ergebnissen der Vorabklärungen resultierenden Änderungsvorschläge für die Wasserempfindlichkeitsprüfung wurden bei der Validierung des Verfahrens mit zehn verschiedenen HMF berücksichtigt. Die wichtigsten Angaben der 10 HMF finden sich in Tabelle 2.

Nr.	Mischgut- sorte	Recycling- Material [Masse-%]	Bindemittel			HM soll [Vol-%]
			Haftver- mittler [Masse-%]	zugegebene Bindemittelsorte, Angabe des Mischwerkes	I. A. soll [Masse-%]	
1	HMF 22	40% A-Granulat ¹	-	180/220	3.5%	5.9%
2	HMF 22	30% A-Granulat	0.11-0.2%	300	3.1%	8%
3	HMF 22	22.5% Glas	0.2%	80/100	3.1%	8%
4	HMF 22	22.5% Glas, 30% A-Granulat	0.11-0.2%	300	3.1%	8%
5	HMF 22	-	0.2%	80/100	3.1%	8%
6	HMF 22	-	- ²	80/100	4.4%	7...9%
7	HMF 32	60% A-Granulat	-	180/220	3.2%	8.1%
8	HMF 32	50% A-Granulat	0.07-0.2%	180/220	3.4%	6.5%
9	HMF 32	-	0.2%	80/100	3.1%	7%
10	HMF 16	30% Glas	0.2%	80/100	3.4%	7.5%

¹ Asphalt-Granulat
² keine Angaben

I. A.: Anteil an löslichen Bindemittel
HM: Hohlraumgehalt Marshall

Tabelle 2: Wichtigste Kenndaten der untersuchten HMF-Mischgutsorten

Aus der Untersuchung der 10 HMF zeigte sich, dass die aus den Vorabklärungen resultierenden Änderungsvorschläge für die Prüfprozedur zweckmässig sind.

In Tabelle 3 sind für jede HMF die mittleren Spaltzugfestigkeiten beider Serien mit ihren statistischen Kennwerten und den entsprechenden TSR-Werten angegeben. Nebst der HMF-Sorte ist auch das enthaltene Recycling Material und der Hohlraumgehalt HM_{par} an 4 zusätzlichen paraffinierten Prüfkörpern angegeben. Über alle HMF ergab sich eine durchschnittliche Zugfestigkeit "trocken" von 1464 kPa bzw. eine Zugfestigkeit "nass" von 1115 kPa. Der TSR der 10 unterschiedlichen HMF bewegte sich mit 68 ... 88% in einer relativ engen Spannbreite von 20%; in 7 von 10 Fällen wurde die Mindestgrenze von 80% nicht erreicht. Die Zugfestigkeit der Serie "nass" wurde mit der Höhe des Prüfkörpers im trockenen Zustand (Höhe 1) und nach der Sättigung (Höhe 2) berechnet, um einen eventuell vorhandenen Einfluss der Quellung festzustellen. Bei keiner der 10 HMF wurde ein grosser Einfluss festgestellt.

HMF Nr.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Mittelwert
Nominelles Grösstkorn [mm]	22	22	22	22	22	22	32(45)	32	32	16	
Recycling [Masse-%]	Glas	-	-	22.5	22	-	-	-	-	-	30
	Asphalt-Granulat	40	30	-	30	-	-	60	50	-	-
	Mineral	40	-	-	-	-	-	40	-	-	-
Hohlraumgehalt HM_{par} [Vol.-%]	8.6	9.1	8.2	8.5	9.6	9.5	6.7	9.5	9.1	9.4	8.8
SERIE TROCKEN											
MW Zugfestigkeit \blacklozenge_{td} [kPa]	1312	1491	1375	1301	1532	1271	1934	1654	1543	1230	1464
*MW rel. Abw. (EW - MW) von S_{td} [%]	5.8	6.6	9.3	4.7	4.1	10.9	11.8	2.6	4.2	3.2	6.3
**max. rel. Abw. (EW - MW) von S_{td} [%]	8.3	12.1	22.8	8.3	11.0	22.8	16.4	4.1	9.0	6.4	12.1
Standardabweichung $s(S_{td})$ [kPa]	87.5	119.8	151.7	72.2	89.2	176.2	250.8	52.6	83.2	47.4	113.1
Variationskoeffizient $V(S_{td})$ [%]	6.7	8.0	11.0	5.5	5.8	13.9	13.0	3.2	5.4	3.9	7.6
SERIE NASS											
MW Zugfestigkeit \blacklozenge_{tm1} (Höhe 1) [kPa]	1153	1115	1058	903	1047	1069	1587	1241	1135	841	1115
*MW rel. Abw. (EW - MW) von S_{tm1} [%]	3.4	13.0	5.6	7.9	6.4	6.5	9.0	3.0	4.1	2.3	6.1
**max. rel. Abw. (EW - MW) von S_{tm1} [%]	5.5	42.6	18.7	19.1	13.1	13.8	22.3	6.0	6.3	3.7	15.1
Standardabweichung $s(S_{tm1})$ [kPa]	46.8	183.6	83.3	91.7	93.3	98.9	187.2	50.7	53.6	23.0	91.2
Variationskoeffizient $V(S_{tm1})$ [%]	4.1	16.5	7.9	10.2	8.9	9.3	11.8	4.1	4.7	2.7	8.0
MW Zugfestigkeit \blacklozenge_{tm2} (Höhe 2) [kPa]	1153	1115	1057	900	1044	1069	1601	1241	1135	841	1112
rel. Diff. MW Zugfestig. (Höhe 1, 2) [%]	0.01	0.01	0.08	0.27	0.22	0.02	0.91	0.02	0.04	0.02	0.16
TSR ₁ (Höhe 1) [%]	87.9	74.8	76.9	69.3	68.3	84.1	82.0	75.0	73.5	68.4	76.0
TSR ₂ (Höhe 2) [%]	87.9	74.8	76.8	69.2	68.2	84.1	82.8	75.1	73.6	68.4	76.1
* Mittelwert der 6 relativen Abweichungen zwischen jedem Einzelwert S_{ij} der Serie zu ihrem Mittelwert \blacklozenge_t											
** maximaler Wert der 6 relativen Abweichungen zwischen jedem Einzelwert S_{ij} der Serie zu ihrem Mittelwert \blacklozenge_t											

Tabelle 3: Mittlere Spaltzugfestigkeiten und TSR mit Angabe von Abweichungen und statistischen Kennwerten für die 10 untersuchten HMF

Abbildung 3 zeigt die Beziehung zwischen TSR und dem Hohlraumgehalt an 4 zusätzlichen paraffinierten Prüfkörpern für die Untersuchungen an den 10 HMF. Die Folgerung aus den Vorabklärungen, dass keine allgemeine Abhängigkeit des TSR vom Hohlraumgehalt ersichtlich ist, kann hier zumindest für den Bereich 6.5 bis 9.5 Vol.-% bestätigt werden. Dabei ist zu beachten, dass alle HMF mit 50 Schlägen verdichtet wurden; in den Vorabklärungen wurden hingegen unterschiedliche Schlagzahlen verwendet (siehe Abbildung 2). Teilweise weisen HMF mit hohem (bzw. niedrigem) Hohlraumgehalt niedrige (bzw. hohe) TSR-Werte auf, aber HMF, die diesem Trend weniger folgen sind auch vorhanden.

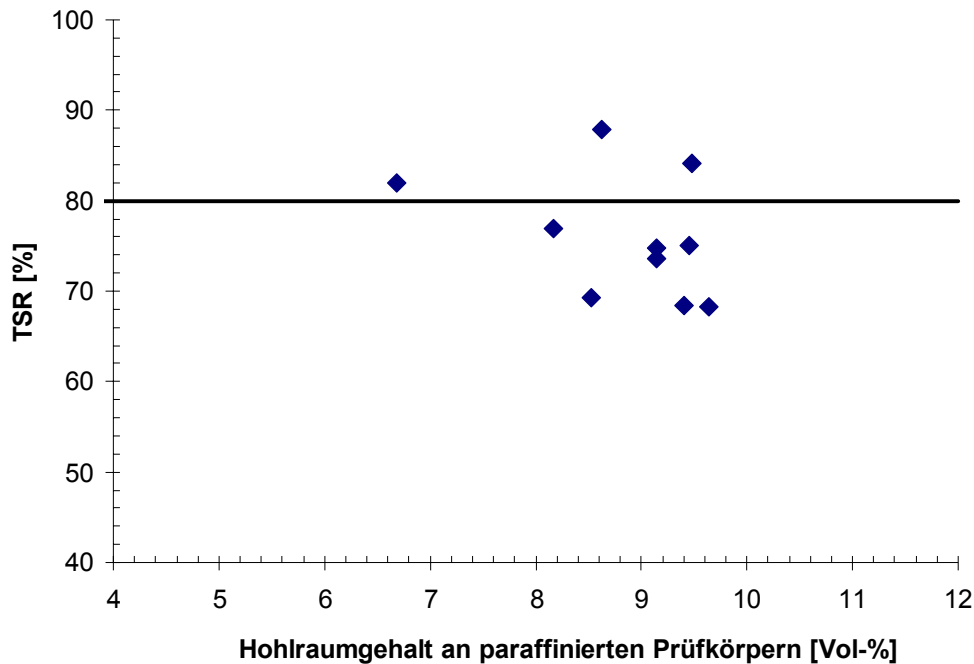


Abbildung 3: Beziehung zwischen TSR und dem Hohlraumgehalt an paraffinierten Prüfkörpern für die Untersuchungen an 10 verschiedenen HMF (HM-Mittelwerte aus 4 Prüfkörpern)

Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

Die Vorabklärungen und die Untersuchung der 10 HMF zeigten, dass die **Serie b** nicht notwendig ist. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen die Prüfung der Wasserempfindlichkeit nur an Prüfkörpern mit der seit langem bereits üblichen Verdichtung von 50 Schlägen durchzuführen.

Mit einer **Sättigung von 300 mbar** absoluten Drucks lagen die meisten Einzelwerte und praktisch alle Mittelwerte des partiellen Sättigungsgrades der 10 untersuchten HMF (mit mittlerem und hohem Hohlraumgehalt) innerhalb der gemäss Vorabklärungen nicht mehr zu überprüfenden Sättigungsgrenzen. Einen Druck, bei welchem Prüfkörper sämtlicher HMF einen Sättigungsgrad in der verlangten Spannweite erzielen, gibt es allerdings nicht. Entweder weisen HMF mit niedrigem Hohlraumgehalt einen Sättigung unter 55 Vol.-% auf, oder die 80 Vol.-% werden bei hohem Hohlraumgehalt teilweise überschritten. Trotzdem wird vorgeschlagen, stets mit einem absoluten Druck von 300 mbar zu sättigen, um eine allfällige Beschädigung von Prüfkörpern durch höheres Vakuum zu vermeiden.

TSR und Zugfestigkeit der 10 HMF wurden in Bezug auf mögliche **Einflussfaktoren** untersucht. Es wurde keine eindeutige Korrelation zwischen TSR bzw. Zugfestigkeit-Mittelwerten und den mittleren Hohlraumgehalten bzw. Sättigungsgraden gefunden. Die Zugfestigkeits-Einzelwerte innerhalb einer Serie einer bestimmten HMF fallen aber generell bei Anwendung eines konstanten Druckes mit steigendem Hohlraumgehalt (bzw. Sättigungsgrad) mehr oder weniger linear ab. Filler- und Bindemittelgehalt beeinflussen den TSR nur teilweise. Niedrige TSR-Werte wurden häufig bei hohem Filler- und niedrigem Bindemittelgehalt festgestellt. Eine eindeutige Korrelation konnte aber nicht nachgewiesen werden. Die Tatsache, dass keine eindeutigen Einflussfaktoren ermittelt werden konnten, ist teilweise auf die Unsicherheit der Ergebnisse zurückzuführen, aber auch darauf, dass es schwierig ist, Korrelationen bei einer kleinen Anzahl von 10 Werten zu finden. Zudem ist anzunehmen, dass eher eine Kombination verschiedener Einflussfaktoren zum Tragen kommt.

Dass so viele HMF (7 von 10) die in der Norm definierte **TSR-Grenze** von 80% unterschritten, ist sicherlich nicht repräsentativ für alle HMF in der Schweiz. Doch deutet dies darauf hin, dass mit grosser Wahrscheinlichkeit die TSR-Grenze oft nicht eingehalten wird. Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann allerdings nicht beurteilt werden, ob die TSR-Grenze für HMF bei 80% zu hoch angesetzt ist oder die HMF im Allgemeinen eine ungenügende Wasserempfindlichkeit aufweisen. Im Vergleich zur Anforderung an die Marshall-Werte ist die TSR-Anforderung aber viel strenger, da die untersuchten HMF eine Marshall-Stabilität aufwiesen, die zwei- bis vierfach grösser war als die entsprechende Anforderung, während die TSR-Anforderung nur in 3 von 10 Fällen eingehalten wurde. Die aufgrund einzuhaltender Mischgut-Kennwerte geforderte Zusammensetzung der HMF ist eventuell für das Erreichen eines TSR von 80% nicht adäquat.

Die **statistische Auswertung** zeigte, dass die Messunsicherheit im TSR je nach HMF zwischen 4.5 und 17% betrug. Ab Messunsicherheiten von 10% beginnt das 95% TSR-Vertrauensintervall unterhalb der TSR-Mindestgrenze von 80% und endet oberhalb, so dass nicht eindeutig ist, ob der wahre Wert des TSR diese Grenze erreicht. Nur eine HMF lag mit ihrem gesamten Vertrauensintervall oberhalb der 80% Grenze, auch wenn drei HMF einen TSR über dieser Grenze aufwiesen.

Wird die Prüfung mit 2x3 **Prüfkörpern** gemäss jetziger Norm durchgeführt, würden die Unsicherheiten des TSR noch um ca. 30% grösser sein, als die hier mit 2x6 Prüfkörpern bestimmten. Eine Prüfung mit weniger als 2x6 Prüfkörpern wird daher nicht empfohlen. Durch die Abschaffung der Serie b bleibt die Gesamtzahl der Prüfkörper gleich wie bisher. Eine Behandlung von **Ausreissern** zur Reduktion der Streuung innerhalb der Serie sollte in Erwägung gezogen werden.

Vorgeschlagene Änderungen für die Schweizer Norm SN 640 452c

Im Folgenden werden stichwortartig die wichtigsten Änderungsvorschläge für die Prüfung der Festigkeit vor/nach Wasserlagerung aufgelistet, welche die neue Version der Schweizer Norm für HMF SN 640 452d beinhalten sollte:

- die Serie b (Soll-Hohlraumgehalt + 4 Vol.-%, mit kleiner Verdichtungsenergie) wird eliminiert, d.h. nur Serie a (Soll-Hohlraumgehalt) wird geprüft
- dafür doppelte Anzahl Prüfkörper, 6 anstatt 3 für Teilserie "trocken" bzw. "nass" (Gesamtzahl bleibt gleich)
- Serienbildung ("trocken" und "nass") anhand der Rohdichte im Ausmessverfahren
- Teilserie "nass": Partielle Sättigung mit 300 ± 25 mbar absoluten Drucks für alle HMF und Verzicht auf Berechnung und Begrenzung des Sättigungsgrades
- Konditionierung der Teilserie "trocken" im Wasserbad: Prüfkörper sind wasserdicht zu verpacken
- Einführung einer maximalen Abweichung vom Einzelwert zum Mittelwert für die Spaltzugfestigkeit

Tabelle 4 enthält eine Übersicht über die verschiedenen Arbeitsschritte der Wasserempfindlichkeits-Prüfung nach der jetzigen Norm SN 640 452c [12], der amerikanischen Norm ASTM 4867 [9] und der im Forschungsauftrag 27/98 [2] verwendeten Prüfprozedur sowie der daraus folgenden vorgeschlagenen Prüfprozedur für die SN 640 452d.

Arbeitsschritt	nach SN 640 452c	nach ASTM 4867	FA 27/98 Prüfprozedur	EMPA Vorschlag für SN 640 452d
-----------------------	-----------------------------	---------------------------	----------------------------------	---

1. Serien/Teilerien

Serien	6 PK Serie a (50 Schläge für Soll-HM) 6 PK Serie b (X Schläge für Soll-HM + 4 Vol.-%)	6 PK Serie a (Verdichtung für HM in Praxis, 7±1 Vol.-%)	12 PK Serie a (50 Schläge für Soll-HM)
Bildung Teilerien (trocken, nass)	mit üblicher HM-Bestimmungsmethode (Tauchwägung)		mit HM im Ausmessverfahren

2. Teilerie "nass"

Druck für Sättigungsgrad	notwendiger Druck um Grenzen einzuhalten	300 ± 25 mbar Druck 5 Min.	
Grenzen des Sättigungsgrades	Minimum: 55 Vol.-% Maximum: 80 Vol.-%	keine	
Berechnung des Sättigungsgrades	Ja, für Einhaltung der Grenzen: Nachsättigen bei < 55 Vol.-%, Ausscheiden bei > 80 Vol.-%	Nicht notwendig, aber für Auswertung berechnet	Nein
Wasserlagerung	Wasserbad 24h 60°C		
Konditionierung	Wasserbad 25°C		
	1h	so lange bis Temp. im PK erreicht ist	

3. Teilerie "trocken"

Konditionierung	im Wasserbad 25°C PK nicht verpackt	im Wasserbad 25°C PK wasserdicht verpackt
	20 Min.	wie für Teilerie "nass"

4. Spaltzugversuch

Prüfung	gleich	
TSR-Anforderung	Mindestens 80%	keine Aussage

Tabelle 4: Vergleich der Arbeitsschritte der Wasserempfindlichkeits-Prüfung nach: SN 640 452c, ASTM 4867, FA 27/98 Prüfprozedur und EMPA-Vorschlag für SN 640 452d (PK: Prüfkörper)

Die neue Prozedur zeichnet sich aus durch Klarheit, Einfachheit und schnelle Durchführbarkeit. Sie führt ausserdem zu Ergebnissen mit geringeren Messunsicherheiten. Dadurch ist sowohl den Prüflabors als auch den Mischgutherstellern und Bauherren gedient.

EMPA-Prüfvorschrift für die Prüfung der Wasserempfindlichkeit

Für die Prüfung der Festigkeit vor und nach Wasserlagerung sind 12 Marshall Prüfkörper mit dem Soll-Hohlraumgehalt (50 Schläge) zu prüfen (siehe Abbildung 4). Es wird angenommen, dass sie den in Ziffer 13 der Norm [12] berechneten Hohlraumgehalt aufweisen und dieser wird nicht erneut bestimmt. Im trockenen Zustand sollen für die 12 Prüfkörper Masse, Höhe und Durchmesser bestimmt werden. Die 12 Prüfkörper sind in zwei Teilerien à 6 Prüfkörper

(Teilserien "trocken" und "nass") so zu verteilen, dass die mittlere Rohdichte im Ausmessverfahren der Teilserien ähnlich ist (zul. Abw.: 0.01 g/cm^3).

Die Prüfkörper der Teilserie "nass" sind mit $300 \pm 25 \text{ mbar}$ absoluten Drucks (Vakuum von ca. 700 mbar) bei Raumtemperatur partiell zu sättigen. Dafür werden die Prüfkörper in einem mit destilliertem Wasser von Raumtemperatur gefüllten und luftdichten Behälter gelegt und an eine Unterdruck-Apparatur angeschlossen. Der Zeitraum, ab dem die 300 mbar erreicht werden bis Luft in das Gefäß eingelassen wird, soll 5 Minuten betragen. Dabei ist darauf zu achten, dass das Einlassen von Luft langsam durchgeführt wird. Die Prüfkörper sind dann 24 h bei $60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ im Wasser zu lagern und anschliessend so lange bei $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ in destilliertem Wasser zu konditionieren bis der Prüfkörper die Temperatur von 25°C erreicht hat. Die Umlagerung der Prüfkörper von einem Wasserbad in das andere sollte so schnell wie möglich erfolgen. Nach der Konditionierung und unmittelbar vor dem Spaltzugversuch ist die Höhe nochmals zu messen. Die Umlagerung der Prüfkörper von einem Wasserbad in das andere oder der Transport zur Messapparatur sollte wenn möglich mit Hilfe eines mit 25°C Wasser gefüllten Gefässes durchgeführt werden.

Die Prüfkörper der Teilserie "trocken" sind gleich lang wie die Prüfkörper der Teilserie "nass" in einem Wasserbad mit destilliertem Wasser von $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ zu konditionieren. Die Prüfkörper müssen dabei wasserdicht verpackt sein.

Danach ist sofort die Bruchkraft (Maximallast) aller Prüfkörper im Spaltzugversuch bei Raumtemperatur zu bestimmen (Vorschubgeschwindigkeit $50 \pm 2 \text{ mm/Minute}$); der Spaltzugversuch muss innerhalb einer Minute erfolgen. Die Prüfkörper sind unmittelbar nach dem Wasserbad in die Prüfform zu legen. Dabei ist zu beachten, dass der Prüfkörper in Bezug auf den Lasteinleitungsstreifen (Breite= $1/8$ vom Durchmesser) zentriert und parallel positioniert wird, so dass er diametral beansprucht werden kann. Nach der Prüfung sind sämtliche Prüfkörperflächen und Bruchflächen sofort visuell zu beurteilen. Der TSR wird aus dem Verhältnis der mittleren Zugfestigkeiten der Teilserien "trocken" und "nass" berechnet.

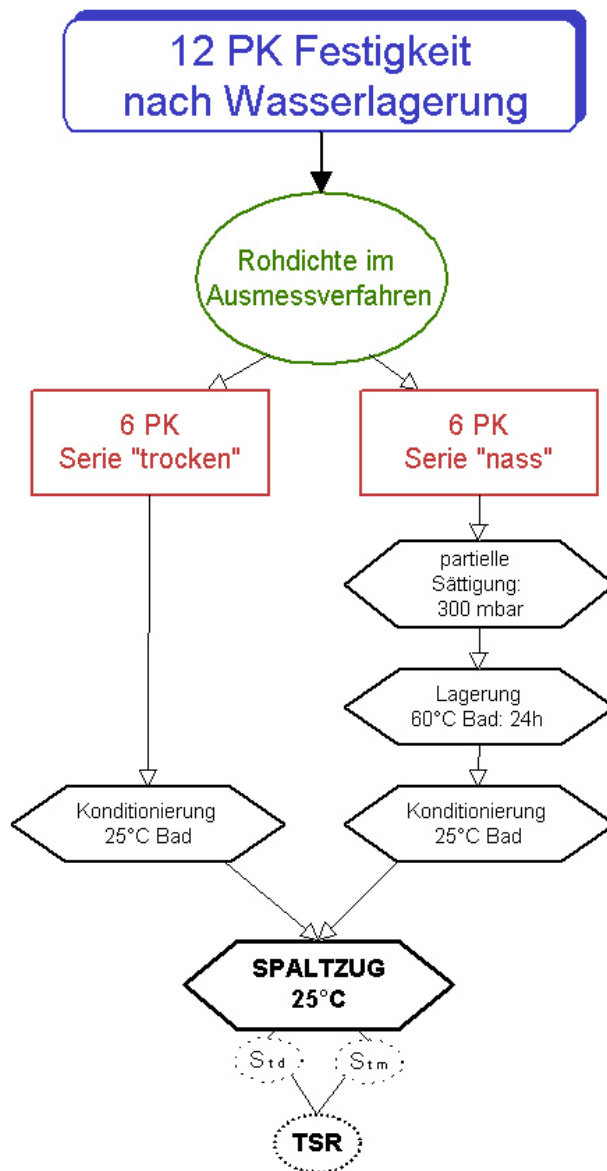


Abbildung 4: Von der EMPA vorgeschlagene Prüfprozedur der Festigkeit nach Wasserlagerung für die SN 640 452d

Schlusswort und Ausblick

Um das hier vorgeschlagene Verfahren in das Schweizer Normenwerk übernehmen zu können, muss es in einem Ringversuch zunächst validiert werden. Aus den Untersuchungsergebnissen dieses Forschungsberichts kann nicht beurteilt werden, ob die TSR-Mindestgrenze bei 80% sinnvoll ist. Wird der Ringversuch mit einer grösseren Anzahl HMF durchgeführt, könnte diese Grenze besser beurteilt werden. Die Validierung der TSR-Grenze im Bezug auf die Performance in der Praxis wäre in einer zusätzlichen Studie näher zu betrachten.

Nach der Ausgabe der neuen Version der SN 640 452, sollte die Prüfung in der Anfangsphase anhand von Erfahrungen unterschiedlicher Anwender und somit verschiedener HMF endgültig validiert werden.

Die Anwendung von Marshall Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 150 mm zur Reduktion der Prüfkörperinhomogenität sollte näher untersucht werden.

In Bezug auf die Erarbeitung bzw. Revision anderer Normen, sollte überlegt werden, ob nicht auch Anforderungen an die Wasserempfindlichkeit für andere Schichten, wie Deck- und Tragschichten (z. B. Drainasphalt), zu stellen sind.

Literatur

- [1] Epps et al.: "Compatibility of a test for moisture-induced damage with Superpave volumetric mix design", National Cooperative Highway Research Program report 444, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D. C., 2000
- [2] Gonzalez Lakehal, S., Partl, M. N.: "Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Heissmischfundationsschichten", Forschungsauftrag 27/98 auf Antrag der Vereinigung der Strassenfachleute (VSS), Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, 2000
- [3] Partl, M. N., Fritz, H. W.: "Heissmischfundationsschichten HMF. Erläuterungen und Stellungnahme zur neuen Schweizer Norm 640 452c", aus «Volkswirtschaftlich optimierter Strassenoberbau und Substanzerhaltung», Sonderdruck aus "Strasse und Verkehr" Nr. 2/1999
- [4] Raab, C.: "Neue Prüfverfahren der Normen SN 640 431 b und Schweizer Norm 640 452c: Festigkeit nach Wasserlagerung", Unterlagen zum Seminar vom 17. und 18. August an der EMPA, Dübendorf, 1998
- [5] Raab, C., Gonzalez Lakehal, S., Budvytyte, G.: "Ausgewählte Aspekte der Belagsprüfung", Strasse und Verkehr 10/2000
- [6] Schellenberger, W.: "Anwendung und Aussagemöglichkeiten der Spaltzugprüfung", Bitumen, Heft 3, 2000
- [7] Takahashi, S., Partl, M. N.: "Improvement of Mix Design for Porous Asphalt", Report 113/11, Japan Highway Public Corporation, Expressway Research Institute, Machida, Japan; EMPA Dübendorf, 1999
- [8] AASHTO T 283-85: "Resistance of Compacted Bituminous Mixtures to Moisture-induced Damage", 1985
- [9] ASTM D 4867-92: "Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures", 1993
- [10] SN 640 433a: "Drainasphalt-Deckschichten: Konzeption, Anforderungen, Ausführung" 1996
- [11] SN 640 452b: "Heissmischfundationsschichten HMF: Anforderungen, Ausführung", 1989
- [12] SN 640 452c: "Heissmischfundationsschichten HMF: Anforderungen, Ausführung", 1997
- [13] SN 671 967a: "Bituminöses Mischgut: Rohdichte, Berechnen des Hohlraumgehaltes", 1981