

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
Institut federal da controlla da material e da retschertgas
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

EMPA
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
Tel. +41-1-823 55 11
Fax +41-1-821 62 44



Bestimmung des Wassersättigungsgrades von Walzasphalt

Détermination du degré de saturation en eau des enrobés bitumineux compactés

Test Method for Water Saturation of Asphalt Pavements

Forschungsauftrag 26/98 auf Antrag der
VSS, Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute

Forschungsstelle:

EMPA, CH-8600 Dübendorf

Autoren:

L. D. Poulidakos, M.S. Civil Eng.

M. N. Partl, Prof., Dr. Dipl. Ing., ETH

EMPA Nr. 201465

Dezember 2004

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 3 |
| TABELLENVERZEICHNIS | 4 |
| ZUSAMMENFASSUNG..... | 5 |
| ABSTRACT | 7 |
| RÉSUMÉ | 9 |
| SYMBOLVERZEICHNIS | 11 |
| 1 AUSGANGSLAGE..... | 13 |
| 2 ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES | 14 |
| 3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN..... | 15 |
| 3.1 Mechanismen der Wasserschädigung | 15 |
| 3.1.1 Adhäsion..... | 15 |
| 3.1.2 Kohäsion..... | 16 |
| 3.1.3 Bindemittelablösung | 16 |
| 3.2 Berechnung verschiedener Kennwerte für Marshall-Prüfkörper | 16 |
| 3.2.1 Druckeinheiten..... | 16 |
| 3.2.2 Dichte und Rohdichte | 17 |
| 3.2.3 Hohlraumgehalt „Marshall“ HM | 18 |
| 3.2.4 Sättigungsgrad | 19 |
| 4 STAND DER FORSCHUNG UND DER NORMUNG..... | 21 |
| 4.1 Stand der Forschung | 21 |
| 4.1.1 Einfluss des Wassers und des Druckes..... | 21 |
| 4.2 Stand der Normung | 28 |
| 4.2.1 Sättigung gemäss Schweizer Norm SN 640 452c [29] | 28 |
| 4.2.2 Sättigung gemäss Amerikanischer Norm ASTM [1]..... | 29 |
| 4.2.3 Sättigung gemäss der Europäischen Norm EN 12697-12 [4] | 29 |
| 5 FORSCHUNGSPROGRAMM | 31 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6 | MATERIALIEN UND EIGENSCHAFTEN | 32 |
| 6.1 | Verdichtung Marshall..... | 32 |
| 6.2 | Materialwahl | 32 |
| 6.3 | Bestimmung von Dichte, Rohdichte und Hohlraumgehalt | 37 |
| 7 | SÄTTIGUNGSUNTERSUCHUNG | 38 |
| 7.1 | Evaluation verschiedenen Sättigungsmethoden- 1.Schritt | 38 |
| 7.1.1 | Prüfbedingungen | 38 |
| 7.1.2 | Ergebnisse der Evaluation-1.Schritt..... | 41 |
| 7.2 | Überprüfung der ausgewählten Sättigungsverfahren-2.Schritt..... | 41 |
| 7.2.1 | Wirksamer Sättigungsgrad | 44 |
| 8 | FOLGERUNGEN, UMSETZUNGEN UND EMPFEHLUNGEN..... | 49 |
| 8.1 | Allgemeine Folgerungen | 49 |
| 8.2 | Vorschläge für Elemente eine Prüfmethode in Ergänzung zu [3] | 49 |
| 9 | ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSRICHTUNGEN..... | 50 |
| 10 | DANK..... | 51 |
| 11 | LITERATUR- UND NORMENVERZEICHNIS | 52 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| <i>Abbildung 3.1: Definition der Massen- und Volumenanteile von Asphalt</i> | 17 |
| <i>Abbildung 4. 1: Der „Hamburg Wheel Tracking Test“ prüft zwei Prüfkörper gleichzeitig unter Wasser (Univ. von Kalifornien, Berkeley)</i> | 22 |
| <i>Abbildung 4. 2 Änderung des dynamischen Moduls von drei Mischgutsorten C1, C2 und C3 aus Kalkstein während 24 Stunden mit den Wasserpermeabilitäten 72.37, 64.24 and 29.39 ($\cdot 10^{-5}$ cm/s) [9].</i> | 24 |
| <i>Abbildung 4. 3: Variationen des Moduls (E^*) in Funktion des Sättigungsgrads für drei Mischgutsorten C1, C2 und C3 mit den Wasserpermeabilitäten 72.37, 64.24 und 29.39 ($\cdot 10^{-5}$ cm/s) [9]</i> | 25 |
| <i>Abbildung 4. 4: Theoretische Kurven der Spaltzugfestigkeit nach einer Lagerung bei 60°C über einen Zeitraum von 14 Tagen. Der Wert K, beschreibt die Geschwindigkeit der Schädigungszunahme [13].</i> | 27 |
| <i>Abbildung 6. 1: Korngrößenverteilungen der Materialien 1 bis 4</i> | 35 |
| <i>Abbildung 6. 2: Korngrößenverteilungen der Materialien 5 bis 7</i> | 36 |
| <i>Abbildung 7. 1: Sättigungsgrade nach Methode sv:g, sv:h, sv:f, verschiedene Mischgut-Materialien (Mittelwert für drei Prüfkörper)</i> | 43 |
| <i>Abbildung 7.2: Sättigungsgrade nach Methode sv:g, sv:h, sv:f, verschiedene Materialien als Funktion des Hohlraumgehaltes</i> | 43 |
| <i>Abbildung 7. 3: Beziehung zwischen Mischguttyp und Sättigungstyp</i> | 44 |
| <i>Abbildung 7. 4: Unterschiede des Wassergehaltes bei gleichem Sättigungsgrad (Beispiel SGM=50%) $V_{\text{wasserA}}/V_{\text{mb}} \neq V_{\text{wasserB}}/V_{\text{mb}}$</i> | 45 |
| <i>Abbildung 7. 5: Sättigungsgrad SGM für sv:g im Vergleich mit dem wirksamen Sättigungsgrad (S_{wirk}) für verschiedene Hohlräume</i> | 47 |
| <i>Abbildung 7. 6: Sättigungsgrad SGM, sv:g im Vergleich mit dem wirksamen Sättigungsgrad (S_{wirk}) für verschiedene Mischgutsorten</i> | 47 |
| <i>Abbildung 7. 7: Sättigungsgrad SGM, den wirksamen Sättigungsgrad S_{wirk} und den TSR Wert [3] für jede Mischgutsorte</i> | 48 |
| <i>Abbildung 7. 8: der Zusammenhang zwischen SGM bzw. S_{wirk} und dem TSR-Wert</i> | 48 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| <i>Tabelle 4. 1: Ablauf der Wasserempfindlichkeitsprüfung gemäss SN 640 452c [29]</i> | 28 |
| <i>Tabelle 5. 1: Kurzfassung des Forschungsprogramms (Siehe Tabelle 7.1)</i> | 31 |
| <i>Tabelle 6. 1: Wichtige Kenndaten der untersuchten Materialien 1...7 (EMPA interne Prüfkörperbezeichnung in Klammern) nach [3]</i> | 33 |
| <i>Tabelle 6. 2 Korngrössenverteilungen der Materialien</i> | 34 |
| <i>Tabelle 6. 3: Dichte, Rohdichte und Hohlraumgehalt (EMPA interne Bezeichnung in Klammern)</i> | 37 |
| <i>Tabelle 7. 1: Sättigungsgrad nach verschiedenen Methoden in Vol% (Mittelwert für drei Prüfkörper)</i> | 41 |
| <i>Tabelle 7. 2: Sättigungsgrade, SGM verschiedene Mischgut-Materialien (Mittelwert für drei Prüfkörper)</i> | 42 |
| <i>Tabelle 7. 3: Der Unterschied zwischen Sättigungsgrad SGM und wirksamer Sättigungsgrad Swirk</i> | 46 |

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung und Berechnung des Sättigungsgrades von Marshall-Körpern mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt auf der Basis der ASTM D 4867-92 und das Erarbeiten einer Schweizerischen Prüfvorschrift zur Durchführung der Sättigung und des weiteren das Erarbeiten einer genauen Prüfvorschrift zur Bestimmung des Sättigungsgrades von Heissmischfundationsschichten HMF als Ergänzung und Präzisierung der Norm SN 640 452c.

Wasserschädigungen in Asphaltbetonbelägen sind das Ergebnis zweier Mechanismen: Verlust von Adhäsion und Verlust von Kohäsion. Hauptziel der Laborversuche ist die Simulation und Charakterisierung der Materialien bezüglich in-situ Vorgängen. Deshalb ist es notwendig, insbesondere auch die Mechanismen der Schädigung durch Wasser miteinzubeziehen. Feuchtigkeitsprobleme im Belag werden durch Regen, Überflutung, Frost-Tau-Zyklen und aufsteigende Feuchtigkeit (z.B. Grundwasser) aus den unteren Schichten der Belagstruktur verursacht.

Die hier durchgeführte Untersuchung und eine frühere Studie über die Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Heissmischfundationsschichten (ASTRA Forschungsbericht Nr. 458), zeigen, dass der Sättigungsgrad nur sehr ungenau ermittelt werden kann, weil einerseits die Wägung des Prüfkörpers nach der Sättigung ein unpräzises Wasservolumen ergibt und andererseits die Rohdichtebestimmung ein bedingt realistisches, gesamtes Hohlraumvolumen liefert. Dies gilt sowohl für "unparaffiniert" als auch für "paraffiniert".

Es wäre sinnvoll und praktischer, einen bestimmten absoluten Druck für alle Prüfkörper vorzuschreiben, bei dem der Sättigungsgrad der meisten Prüfkörper innerhalb der ASTM Normgrenzen (55Vol-%...80Vol-%) liegt. Vorgeschlagen wird 300mbar, da dieser Wert aufgrund der durchgeführten Studien für die meisten Gruppen einen optimalen Druck darstellt, um innerhalb der Normgrenzen zu liegen.

Dieser Bericht bestätigt die Empfehlungen der früheren Studie mit folgender Ausnahme: Es ist keine Unterwasserwägung der Prüfkörper erforderlich, und die Sättigungsgrenzen gemäss ASTM sollten weiter behalten werden.

Aus der Literatur ist bekannt, dass, falls die Druckabnahme zu rasch erfolgt, das Wasser mit unerwünscht hoher Geschwindigkeit in Hohlräume hineinschiesst und dadurch interne Strukturen der Prüfkörper verändern kann. Der Druckverlauf ist somit zu spezifizieren.

Es wird daher vorgeschlagen, eine normierte Methode zu benützen, wobei gleiches Endvakuum und gleiche Lagerdauer der Prüfkörper angestrebt werden.

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich folgende Punkte für eine Überarbeitung der Norm ableiten:

1. Alle Prüfkörper, die für die gleichen Prüfungen vorbereitet wurden, sollten mit dem gleichen Druck gesättigt werden.
2. Der durch die Norm definierte minimale Sättigungsgrad um 55Vol% bis 80Vol% kann mit 300mbar Druck erreicht werden.
3. Die Zeitdauer zwischen Konditionierung und Prüfung muss für alle Prüfkörper gleich sein.
4. In Schadenfällen, insbesondere in denen die Prüfkörper einen Unterschied des Hohlraumgehaltes von mehr als 1% aufweisen, und in Forschungsprojekten kann der wirksame Sättigungsgrad in die Beurteilung mit einbezogen werden.
5. Eine untere Grenze (55Vol-%) des Wassergehalts im Prüfkörper, wie in ASTM vorgeschlagen (nicht aber in EN vorgesehen), ist nötig, um die Wirkung des Wassers nachzuweisen. Gleichzeitig ist eine obere Grenze (80Vol-%) des Wassergehalts im Prüfkörper nötig, damit nicht übermässig geschädigte Prüfkörper in die Untersuchungen miteinbezogen werden.

ABSTRACT

The goal of this research project is to develop a laboratory procedure for the evaluation and calculation of saturation of Marshall specimen with various void contents. This procedure is based on the American Standard ASTM D 4867-92 "Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures". Specifically to develop a lab procedure for saturation of hot mix base courses (HMF) and make recommendations for amendments to Swiss Standard SN 640 452c is a main goal.

Damage due to water in Asphalt concrete occurs due to the loss of adhesion or the loss of cohesion. The main goal of laboratory experiments is to simulate and characterize field performance of the material. To this end it is imperative to simulate damage that is a result of the above mechanisms. Problems occurring in pavements that are caused by water are due to rain, flood, freeze-thaw cycles and rising ground water.

This report concentrates specifically on the saturation procedure. In a previous study, Test Method for Water Sensitivity (ASTRA Forschungsbericht Nr. 458), it was concluded that the ASTM Standard does not precisely define the procedure for water saturation and a more precise and reproducible test method was needed. In this study it was determined that the required degree of saturation of 55Vol-%...80Vol-% which is prescribed by ASTM could not be achieved, on a wide spectrum of specimen, unless pressure was applied during the saturation process.

This report confirms the findings of the previous study with the exception that no under water weighing of specimens are necessary and the saturation limits set forth by ASTM are necessary to achieve moisture damage in laboratory specimen and therefore should be observed.

Additionally, it is well established in the literature that if different specimen are saturated with different pressures, due to the effect of pressure on the internal structure and as a result the mechanical properties of the specimen, unequal testing conditions could exist. Therefore it is recommended to use a standard saturation procedure using a the same pressure and conditioning time is used. Therefore a uniform saturation procedure is recommended that would bring the saturation level of all specimen to the prescribed ones of 55Vol-%...80Vol-%.

In summary this report concluded the following which are recommended for the next revision to the Standards:

1. All specimens prepared for a particular test should be saturated using the same pressure.

2. The minimum saturation level required for HMF by the standard could be achieved using 300mbar pressure.
3. The time of testing after conditioning is very important for consistency of results and should be the same for all specimen.
4. In cases where the evaluation of structural damage is desired, especially when the difference in void content between various specimen is more than 1% the degree of saturation could also be based on volume of the specimen rather than the volume of the voids.
5. A minimum saturation level as specified by ASTM (not in EN) is essential for the proper evaluation of the effect of water on the specimen. At the same time an upper allowable saturation level is necessary to exclude specimen that are damaged due to excessive water absorption and swelling.

RESUME

Le but de ce projet de recherche est de développer une méthode de détermination et de calcul du degré de saturation d'éprouvettes Marshall présentant des teneurs en vides différentes sur la base de la norme ASTM D 4867-92 et d'élaborer des prescriptions d'essai suisses pour la réalisation de la saturation et d'élaborer aussi des prescriptions d'essai détaillées pour la détermination du degré de saturation des couches de fondation à chaud HMF à titre de complément et de précision de la norme SN 640 452c.

Les dégâts provoqués par l'eau sur les revêtements en béton bitumineux sont le résultat de deux mécanismes: La perte d'adhésion et/ou la perte de cohésion. Le but principal des essais de laboratoire est la simulation des processus in situ et la caractérisation des matériaux quant à ces processus. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de prendre aussi en compte les mécanismes des endommagements provoqués par l'eau. Les problèmes d'humidité dans les revêtements peuvent être dus à la pluie, aux inondations, aux cycles de gel-dégel et aux remontées d'humidité (p. ex. nappe phréatique) à partir des couches inférieure de la structure du revêtement.

L'étude effectuée ici et le rapport de recherche de l'Ofrou No 458 montrent que le degré de saturation ne peut être déterminé qu'avec une forte imprécision cela parce que d'une part la pesée de l'éprouvette après saturation ne donne qu'un volume d'eau peu précis et que d'autre part la détermination de la masse volumique apparente fournit une valeur de volume total de vides peu fiable. Ceci est valable aussi bien pour les éprouvettes «paraffinées» que «non paraffinées».

Il serait judicieux et plus pratique de prescrire pour toutes les éprouvettes une valeur de pression absolue précise à laquelle le degré de saturation de la majorité des éprouvettes se situe dans les limites de la norme ASTM (55 %-vol.- 80 %-vol.) La valeur proposée est de 300 mbar, car comme le montre la présente étude et [3] cette valeur de pression est optimale pour que la majorité des groupes se situent dans les limites de la norme.

Ce rapport confirme les recommandations formulées dans l'étude précédente à ces exceptions près qu'il n'est pas nécessaire de procéder à une pesée sous l'eau et que les limites de saturation selon ASTM doivent être conservées.

La littérature montre que si la vitesse de diminution de la pression ainsi que la valeur du vide final ne sont pas contrôlées et spécifiées, l'eau peut pénétrer à une vitesse trop élevée dans les vides et provoquer ainsi des modifications de la structure interne des éprouvettes.

C'est pourquoi il est proposé d'utiliser une méthode normalisée avec une valeur du vide final et de la durée de conditionnement identiques.

Ces résultats permettent de formuler les points suivants qui devraient être modifiés dans la norme:

1. Toutes les éprouvettes préparées pour les mêmes essais doivent être saturées à la même pression.
2. Le degré de saturation minimum défini par la norme peut être atteint avec une pression de 300 mbar.
3. Le temps entre le conditionnement et l'essai doit être le même pour toutes les éprouvettes.
4. Dans les cas où les éprouvettes présentent des différences de teneur en vides supérieures à 1 %, le degré de saturation doit être calculé à partir du volume des éprouvettes.
5. Une limite inférieure de la teneur en eau (55 %-vol.) telle que la propose la norme ASTM (mais qui n'est pas prévue dans la norme EN) est nécessaire pour vérifier l'action de l'eau. De même qu'une valeur limite supérieure (80%-vol) est nécessaire pour éviter d'inclure dans les essais des éprouvettes trop endommagées.

SYMBOLVERZEICHNIS

| | |
|--|--|
| AB. | Asphalt-Beton |
| A-Gr. | Asphalt-Granulat |
| ASTM | <u>A</u> merican <u>S</u> ociety for <u>T</u> esting <u>M</u> aterials |
| ASTRA | Bundesamt für Strassen |
| C1, C2, C3 | Mischgutsorten |
| EMPA | <u>E</u> idgenössische <u>M</u> aterial <u>p</u> rüfung <u>s</u> - und <u>F</u> orschung <u>s</u> an <u>s</u> talt |
| EN | Europäische Norm |
| HM | Hohlraumgehalt nach Marshall |
| HMF | <u>H</u> eiss <u>m</u> isch <u>f</u> undationsschicht |
| HMT | <u>H</u> eiss <u>m</u> isch <u>t</u> ragschicht |
| K | Geschwindigkeit der Schädigungszunahme |
| I. A. | Anteil an löslichen Bindemitteln |
| m₂ | Masse des Prüfkörpers im Wasser (Tauchwägung) |
| m₃ | Masse des Prüfkörpers an der Luft nach der Tauchwägung (feucht) |
| m_{a, gesättigt} | Masse der mit einer Flüssigkeit gefüllten Hohlräume eines Marshall-Prüfkörpers (gesättigte Hohlräume) |
| m_M | Masse des Mischgutes |
| m_{mm} | Masse des wasserfreien Prüfkörpers an der Luft |
| m_{PK, gesättigt} | Masse des gesättigten Prüfkörpers an der Luft nach der Sättigung (nass) |
| m_{PK, trocken} | Masse des trockenen Prüfkörpers an der Luft |
| m_{PK, gesät., Tauchw.} | Masse des gesättigten Prüfkörpers im Wasser (Tauchwägung) |
| RM | Recycling-Mineral |
| RS | Retained Strength, verbleibende Spaltzugfestigkeit, (%) |
| SGM | Sättigungsgrad Marshall |
| SN | <u>S</u> chweizer <u>N</u> orm |
| sv | Sättigungsvariationen |
| S_{wirk} | Wirksamer Sättigungsgrad |
| T | Anzahl Tage |
| V_{mb} | gesamtes Volumen des Prüfkörpers (Mischgut und alle Hohlräume) |
| V_{mm} | Volumen des Mischgutes |
| V_{PK gesät.,} | Volumen des gesättigten Prüfkörpers ohne das Volumen des Wassers (nur |

| | |
|---------------------------------|---|
| M+leereH | Mischgut und leere Hohlräume) |
| V_a | Volumen der gesamten Hohlräume eines Prüfkörpers |
| V_{a, gesättigt} | Volumen der mit einer Flüssigkeit gefüllten Hohlräume eines Marshall-Prüfkörpers (gesättigte Hohlräume) |
| VSS | <u>V</u> ereinigung <u>S</u> chweizerischer <u>S</u> trassenfachleute |
| V_{wasser} | Volumen des Wassers |
| z | statistische Eingangsgrösse |

Griechische Symbole

| | |
|----------------------------|--|
| ρ_m | Dichte des Mischgutes (in EN Rohdichte) |
| ρ_b | Rohdichte des Prüfkörpers (in EN Raumdichte) |
| ρ_w | Dichte des Wassers bei Raumtemperatur |

1 AUSGANGSLAGE

Die Beurteilung der Wasserempfindlichkeit eines Mischgutes ist bezüglich Dauerhaftigkeit unter den gegebenen schweizerischen Klimabedingungen von zentraler Bedeutung, zumal vorzeitige Schädigungen des Belages durch Wasser versteckt und tiefgreifend auftreten und somit enorme Reparaturkosten zur Folge haben können. Deshalb sind geeignete Laborprüfungen von Laborprüfkörpern oder Bohrkernen ein wichtiges Werkzeug zur Qualitätskontrolle und -sicherung des Belages.

Anfangs Januar 1998 wurden zahlreiche überarbeitete Schweizer Normen durch den Schweizerischen Verband der Strassen und Verkehrsfachleute (VSS) neu herausgegeben. Darunter befindet sich auch die Schweizer Norm SN 640 452c "Heissmischfundationsschichten, Anforderung, Ausführung" [29]. Bei der Revision dieser Norm wurde die Prüfung der Wasserempfindlichkeit neu aufgenommen, bei der die Festigkeit von Heissmischfundationsschichten nach Wasserlagerung überprüft werden soll. Ein wichtiger Punkt dieser Prüfung ist die Bestimmung des Sättigungsgrades. Die hierzu in der Norm gemachten Angaben basieren weitgehend auf den Vorgaben der ASTM D 4867-92 "Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures" [1], die allerdings derart unpräzise abgefasst sind, dass eine nach modernen Massstäben im Sinne des Qualitätsmanagements reproduzierbare und praxisnahe Durchführung nicht gewährleistet ist.

Kürzlich hat die EMPA zur oben genannten Norm ein Forschungsprojekt abgeschlossen, welches auch die Basis für die vorliegende ergänzende Forschungsarbeit ist. Es wird daher im folgenden verschiedentlich auf diese Forschungsarbeit Bezug genommen [3]. Dort, wo es als zweckmässig erscheint, werden Erkenntnisse übernommen.

Dieser Bericht stellt somit eine Ergänzung des Berichtes „Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Heissmischfundationsschichten [3]“ dar. Er behandelt einige spezielle für die Normierung relevante Punkte, die aufgrund des Berichtes [3] noch einer weiteren, vertieften Bestätigung bedurften. Aus diesem Grund bezieht sich der Bericht auch auf das SN Normenwerk vor dem Inkrafttreten der Europäischen Normen, zumal die grundsätzlichen, physikalischen Erkenntnisse davon im wesentlichen nicht betroffen sind. Einzelne Begriffe, wie z.B. die Rohdichte, werden jedoch in den Europäischen Normen unterschiedlich verwendet.

2 ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung und Berechnung des Sättigungsgrades von Marshall-Körpern mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt (HMF22, HMF32 und HMT22) auf der Basis der ASTM [1] und das Erarbeiten einer schweizerischen Prüfvorschrift zur Bestimmung des Sättigungsgrades von Heissmischfundationsschichten HMF als Ergänzung und Präzisierung der Norm SN 640 452c [29] als Grundlage für die Überarbeitung weiterer Normen.

3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

3.1 Mechanismen der Wasserschädigung

Wasserschädigungen in Asphaltbetonbelägen sind das Ergebnis zweier Mechanismen: Verlust von Adhäsion und/oder Verlust von Kohäsion. Beide Mechanismen beeinflussen die Bindemittelablösung von den Zuschlagstoffen, wobei die Adhäsion einen direkten Einfluss und die Kohäsion einen indirekten Einfluss ausübt.

3.1.1 Adhäsion

Adhäsion ist definiert als die physikalische Eigenschaft, welche die Bindung zwischen den Oberflächen zweier Körper beschreibt. Sie wird daher auch als Haftfestigkeit bezeichnet. Die Adhäsion zwischen Asphaltbindemitteln und Gesteinen wird vor allem durch folgende Faktoren beeinflusst [18, 25]:

- Kontaktflächenspannung zwischen den beiden Materialien
- chemische Zusammensetzung der beiden Materialien
- Viskosität des Asphaltbindemittels
- Oberflächenstruktur, Porosität, Temperatur und Sauberkeit der Gesteine
- Wassergehalt der Mischung.

Das Adhäsionsphänomen zwischen Asphaltbindemittel und Zuschlagstoffe und damit auch die Bindemittelablösung (Englisch: stripping) von den Zuschlagstoffen kann durch folgende vier Faktoren erklärt werden:

1. mechanische Verbindung
2. chemische Reaktion
3. Oberflächenenergie
4. molekulare Orientierung

In der Realität tritt eine Kombination aller oben genannten Faktoren auf [17, 18, 25].

Adhäsionsverlust bzw. Bindemittelablösung entsteht insbesondere, wenn Wasser zwischen Bindemittel und Zuschlagstoffe eindringt. Dabei ist zu beachten, dass Wasser eine grössere Affinität zu den Steinen besitzt als das Bindemittel.

3.1.2 Kohäsion

Kohäsion ist eine physikalische Eigenschaft, welche den inneren Zusammenhalt eines Stoffes beschreibt. Die Kohäsion des Bindemittels kann durch Wasser verschlechtert werden, welches in das Bindemittel hinein diffundiert und das Bindemittel dadurch erweicht. Kohäsionsverlust kann somit indirekt auch den Adhäsionsverlust beeinflussen.

3.1.3 Bindemittelablösung

Bindemittelablösung wird in erster Linie durch Wasser verursacht [17, 19]: Entweder durch Kohäsionsverlust infolge Schädigung des Bindemittels oder durch Adhäsionsverlust infolge Schädigung der Verklebung zwischen Asphalt und Zuschlagstoffen. Letzteres erlaubt das Eindringen von Wasser in die Kontaktflächen zwischen beiden Materialien. Die Bindemittelablösung hängt nach Mostafa mit folgenden sechs Mechanismen [17] zusammen: Ablösung, Verschiebung, Emulgierung, Reißen des Bindemittelfilms, Porendruck und hydraulischem Durchfluss.

Die Verbindung zwischen Adhäsions-Theorien und „Stripping“ Mechanismen wird im Detail von Kiggundu et al [19] diskutiert. Offenbar sind diese Zusammenhänge sehr kompliziert und im Labor schwierig zu reproduzieren. Gegenwärtig wird die Spaltzugprüfung nach dem modifizierten Lottman-Verfahren am häufigsten zur routinemässigen Beurteilung der Wasserempfindlichkeit von Heissmischasphaltbelägen eingesetzt [3, 11, 17, 18]. Neuere Verfahren wie zum Beispiel der „Hamburg Wheel Tracking Test“ oder Bruchmechanik-Methoden „HMA fracture mechanics framework“ [9] werden hauptsächlich in der Forschung verwendet (vgl. Abschnitt 5). Die Wasserempfindlichkeit unter dynamischer Belastung kann mit dem CAST durch eine modifizierte Ermüdungsprüfung erfasst werden [6].

3.2 Berechnung verschiedener Kennwerte für Marshall-Prüfkörper

Die folgenden in den SN Normen eingeführten Kennwerte für die Marshall-Prüfkörper werden der Vollständigkeit halber kurz zusammengefasst.

3.2.1 Druckeinheiten

Da in der Praxis verschiedene Einheiten benützt werden, sei daran erinnert, dass folgende Beziehungen gelten:

$$1\text{Pa}=1\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$1\text{bar}= 1\text{atm} = 760.0 \text{ mm Hg}= 101.325 \text{ kPa} \approx 10^5 \text{ Pa}$$

3.2.2 Dichte und Rohdichte

Grundlage der folgenden Ausführungen bilden die beiden Schweizer Normen SN 671 965a [30] und SN 671 967a [31]. Die Rohdichte ρ_R ist definiert als Verhältnis der Masse eines Prüfkörpers zu seinem Volumen einschliesslich aller vorhandenen Hohlräume, die Dichte ρ_m dagegen als Verhältnis der Masse eines Prüfkörpers zu seinem Volumen ohne Hohlräume (Abbildung 3.1). Die Rohdichte bzw. der Hohlraumgehalt wird in dieser Arbeit für Prüfkörper mit dichter Struktur berechnet. Da deren Wasseraufnahme vernachlässigt werden kann, müssen diese Prüfkörper nicht paraffiniert werden.

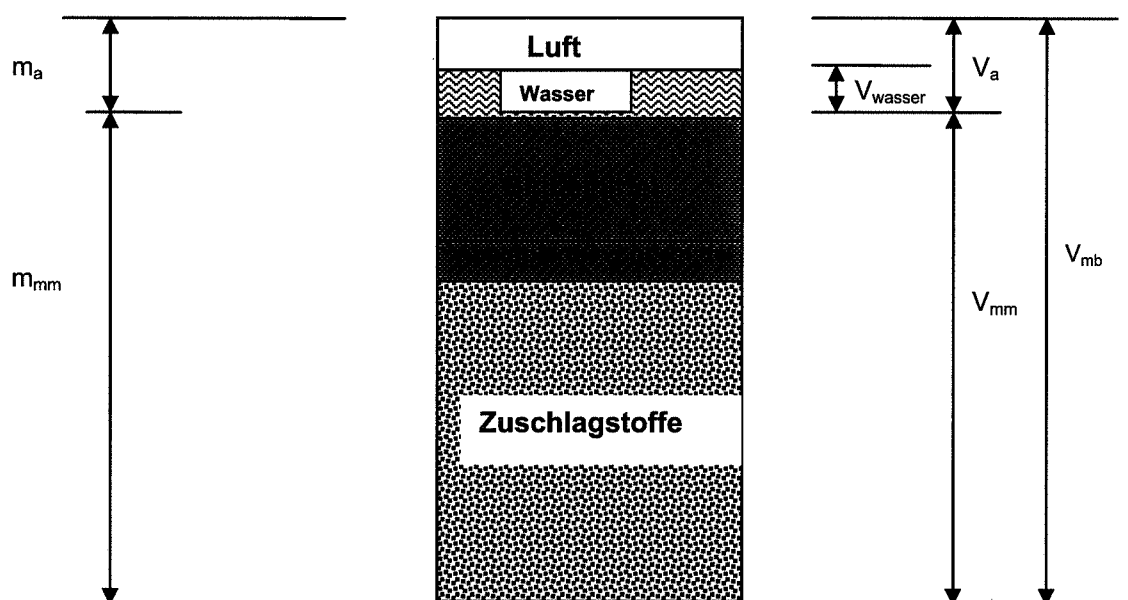


Abbildung 3. 1: Definition der Massen- und Volumenanteile von Asphalt

$$\rho_b = \frac{m_{mm}}{V_{mm} + V_a} = \frac{m_1 \cdot \rho_w}{m_3 - m_2} \quad (3.1)$$

$$\rho_m = \frac{m_{mm}}{V_m} \quad (3.2)$$

ρ_b Rohdichte des Prüfkörpers (Raumdichte gemäss EN [27])

ρ_m Dichte des Mischgutes (Rohdichte gemäss EN [26])

m_1 Masse des wasserfreien Prüfkörpers an der Luft

m_{mm} Masse des Mischgutes

V_{mm} Volumen des Mischgutes

V_a Volumen der gesamten Hohlräume eines Prüfkörpers

ρ_w Dichte des Wassers bei Raumtemperatur (Näherungswert: $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

m_2 Masse des Prüfkörpers im Wasser (Tauchwägung)

m_3 Masse des Prüfkörpers an der Luft nach der Tauchwägung (feucht)

Annahme: Die Hohlräume, die bei der Tauchwägung mit Wasser gefüllt sind, bleiben bei der nachfolgenden Wägung an der Luft gleichermassen gefüllt.

Anforderungen nach [31]: Die Wasseraufnahme darf höchstens 0.5 Massen-% betragen. Die Einzelwerte der Marshall-Körper dürfen höchstens $\pm 0.015 \text{ g/cm}^3$ vom Mittelwert abweichen.

3.2.3 Hohlraumgehalt „Marshall“ HM

Der Hohlraumgehalt „Marshall“ (HM) definiert sich aus dem Verhältnis des Volumens der Hohlräume eines Marshall-Prüfkörpers zum gesamten Volumen. Der Hohlraumgehalt kann auch aus der Rohdichte und der Dichte des Mischgutes berechnet werden [31]:

$$HM = \frac{V_a}{V_{mm} + V_a} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_m}\right) \cdot 100 \quad [\text{Vol.-%}] \quad (3.3)$$

3.2.4 Sättigungsgrad

Der Wassersättigungsgrad SGM eines Marshall-Prüfkörpers berechnet sich aus dem Volumenverhältnis der mit Wasser gesättigten Hohlräume zum gesamten Hohlraumvolumen eines Marshall-Prüfkörpers:

$$\text{SGM} = \frac{V_{a,\text{gesättigt}}}{V_a} \cdot 100 = \frac{m_{a,\text{gesättigt}} \cdot \rho_w}{\text{HM} \cdot \frac{m}{\rho_b}} \quad [\text{Vol. - \%}] \quad (3.4)$$

$V_{a,\text{gesättigt}}$ Volumen des Wassers in den gesättigten Hohlräumen eines Marshall-Prüfkörpers

V_a Volumen der gesamten Hohlräume eines Prüfkörpers

HM Hohlraumgehalt des Prüfkörpers

ρ_b Rohdichte des Prüfkörpers

$m_{a,\text{gesättigt}}$ Masse des Wassers in den gesättigten Hohlräumen eines Marshall-Prüfkörpers

m_1 Masse des wasserfreien Prüfkörpers an der Luft

Zusätzlich kann die Berechnung des Wasservolumens der gesättigten Hohlräume auf verschiedenen Ansätzen basieren. Bei den Vorabklärungen zur Durchführbarkeit wird nach der Gleichung (3.6) das Volumen des Wasser in den Hohlräumen aus der Massendifferenz (an der Luft) des gesättigten und des trockenen Prüfkörpers berechnet.

Methode 1 (nach ASTM D 4867-96 [1]):

Diese Methode beruht auf der Gleichung (3.4) wobei jedoch $m_{a,\text{gesättigt}}$ durch folgenden Ausdruck annimmt.

$$m_{a,\text{gesättigt}} = m_{\text{PK, gesättigt}} - m_{\text{PK, trocken}} \quad (3.5)$$

$m_{\text{PK, gesättigt}}$ Masse des gesättigten Prüfkörpers an der Luft nach der Sättigung (nass)

$m_{\text{PK, trocken}}$ Masse des trockenen Prüfkörpers an der Luft

Anforderungen nach [1]: Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers berücksichtigen.

Methode 2 (nach [3]):

Da bei der Wägung des gesättigten Prüfkörpers an der Luft ($m_{\text{PK, gesättigt}}$) Wasser aus dem Prüfkörper entwichen ist und so eine grosse Messunsicherheit entsteht, wird in [3] eine zweite Methode vorgeschlagen. Hier wird das Volumen der gesättigten Hohlräume aus der Differenz zwischen dem gesamten Volumen des Prüfkörpers (inkl. aller Hohlräume) und dem

Volumen des gesättigten Prüfkörpers (abzüglich der gesättigten Hohlräume, aber mit leeren Hohlräumen) ermittelt. Letzteres erfolgt mit Hilfe einer nach der Sättigung durchgeführten Tauchwägung. Um die Hohlräume im gesättigten Zustand bis zur Tauchwägung zu bestimmen, wurden die Prüfkörper nicht an der Luft transportiert sondern mit dem Sättigungsbehälter in das Wasserbad gestellt. Die Prüfkörper werden aus dem Sättigungsbehälter im Wasserbad entnommen und unter Wasser gewogen (Tauchwägung). Das Volumen des Wassers im gesättigten Prüfkörper berechnet sich dann folgendermassen:

$$V_{a, \text{ gesättigt}} = V_{mb} - V_{PK, \text{ gesät. , M+leereH}} = \frac{m_1}{\rho_b} - \frac{(m_1 - m_{PK, \text{ gesät. , Tauchw.}})}{\rho_w} \quad [\text{Vol.-%}] \quad (3.6)$$

| | |
|--------------------------------------|---|
| $m_{PK, \text{ gesät. , Tauchw.}}$ | Masse des gesättigten Prüfkörpers im Wasser (Tauchwägung) |
| V_{mb} | gesamtes Volumen des Prüfkörpers (Mischgut und alle Hohlräume) |
| $V_{PK, \text{ gesät. , M+leere H}}$ | Volumen des gesättigten Prüfkörpers, das ohne das Volumen des Wassers aus einer nach der Sättigung durchgeführten Tauchwägung bestimmt wird |

$V_{a, \text{ gesättigt}}$ kann in Gleichung (3.4) eingesetzt werden, um den Sättigungsgrad zu berechnen.

4 STAND DER FORSCHUNG UND DER NORMUNG

4.1 Stand der Forschung

4.1.1 Einfluss des Wassers und des Druckes

Hauptziel der Laborversuche ist die Simulation und Charakterisierung der Materialien bezüglich in-situ Vorgängen. Deshalb ist es notwendig, insbesondere auch die Mechanismen der Schädigung durch Wasser miteinzubeziehen. Feuchtigkeitsprobleme im Belag werden durch Regen, Überflutung, Frost-Tau-Zyklen und aufsteigende Feuchtigkeit (z.B. Grundwasser) aus den unteren Schichten der Belagsstruktur verursacht. Die Literatur zeigt, dass Wasser und hoher Druck in den Hohlräumen hinsichtlich Belagsschädigung eine grosse Rolle spielen und zwar dann, wenn entweder die Haftung des Bindemittels am Gestein reduziert wird oder die Zuschlagstoffe selber wasserempfindlich sind. Das Wasser besitzt gegenüber dem Gestein eine höhere Affinität als das Bindemittel, so dass dieses vom Wasser verdrängt werden kann [7]. Dies wird u.a. auch in Umhüllungsversuchen [8] simuliert. Bei nicht vollständig umhüllten Körnern hat das Wasser eine direkte Angriffsfläche, um das Bindemittel weiter zu verdrängen. Bei gut umhüllten Körnern können diese durch die dynamische Beanspruchung des Verkehrs brechen und den Bindemittelfilm lokal zerstören. Auch kann der besonders dünne Bindemittelfilm an den scharfen Kanten der Einzelkörner durch mechanische Überbeanspruchung infolge Verkehr oder Temperatureinwirkung reissen und dadurch dem Wasser Angriffsflächen bieten.

An der EMPA wurden kürzlich Forschungsarbeiten durchgeführt, welche den kumulativen Einfluss der Wasserschädigung auf die Steifigkeit im CAST (coaxial shear test), veranschaulichen [6].

Mostafa et al [17] präsentieren einen Überblick über die Theorien für die Adhäsion zwischen Bindemitteln und Zuschlagstoffen. Seine Arbeit behandelt auch die „Stripping“-Mechanismen und die Faktoren, die einen Einfluss auf Adhäsion und „Bindemittelablösung“ haben. Zusätzliche Informationen über die Voraussage der Bindemittelablösung sowie die Verhinderung und Erneuerung des Belags wurden gegeben.

Mehrere Sachstandberichte über Methoden zur Erfassung der Wasserempfindlichkeit sind verfügbar in [20] und [21]. In [20] wird zudem eine kritische Überprüfung der heutigen Methoden, Protokolle und Techniken für Mischgut und Belag vorgenommen. Des weiteren werden die Methoden diskutiert, welche verkehrsbedingte Effekte berücksichtigen wie „Hamburg Wheel Tracking Test“ (Abbildung 4. 1) und „immersion wheel tracker“. In [21] werden die

Ursachen der Wasserschädigung sowie Methoden ihrer Erfassung mit verschiedenen Prüfmethoden diskutiert.

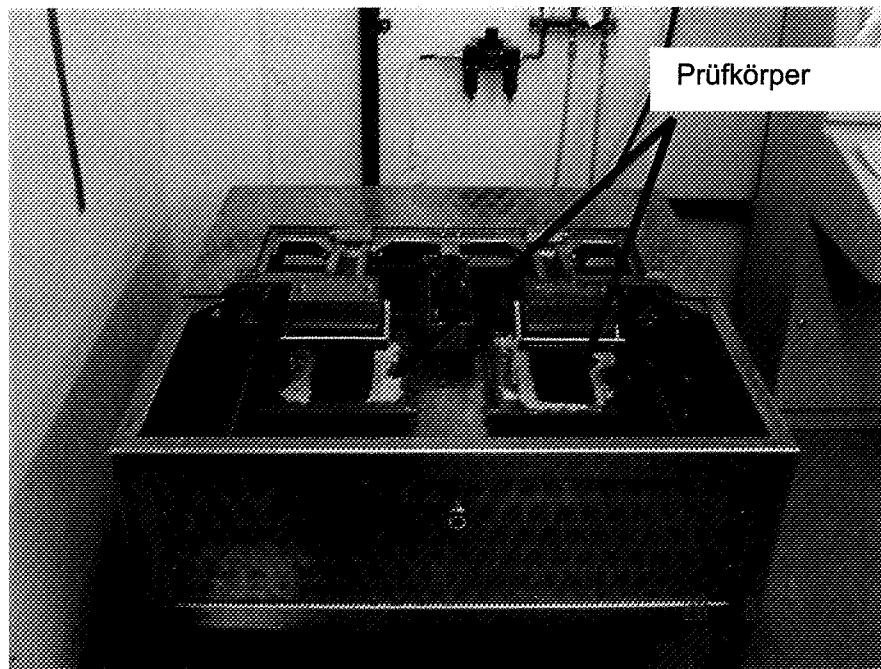


Abbildung 4. 1: Der „Hamburg Wheel Tracking Test“ prüft zwei Prüfkörper gleichzeitig unter Wasser (Univ. von Kalifornien, Berkeley)

Huang et al [8] berichten über den Einfluss der Wechselwirkung zwischen Gesteinen und Bindemitteln. Zuschlagstoffe mit einem hohen Silikatanteil führen unabhängig von der Bindemittelart zu einem vermehrt wasserempfindlichen Mischgut. Die chemische Zusammensetzung von Bindemitteln und Zusatzstoffen sowie deren Zusammenwirken sind ausschlaggebend für die Adhäsion zwischen Bitumen und Gesteinen.

Birgisson et al untersuchten mit Hilfe der Bruchmechanik die Wasserschädigung in Heissmischasphalt in Funktion von Art und Zusammensetzung der Zuschlagstoffe [9]. Die Untersuchung des Einflusses der Grösse der Zuschlagstoffe (fein und grob) bzw. des resultierenden Hohlraumgehalts und der Permeabilität war ein weiteres Ziel dieser Arbeit. Die Arbeit zeigt, dass die Spaltzugprüfung alleine für die Bestimmung der Wasserschädigung nicht ausreicht. An der Universität Florida wurde daher auf bruchmechanischer Basis eine Methode entwickelt, welche die verschiedenen Einflüsse der Wasserschädigung auf das Mischgut in einem einzelnen Kennwert vereinigt. Dieser Kennwert beschreibt die Änderung der Rissbildung durch Wasserlagerung. Birgisson wies darauf hin, dass die heutigen Prüfmethoden nicht zwischen der Wirkung des Porenwassers und der eigentlichen Wasserschädigung zu differenzieren vermögen. In diesem Zusammenhang wurden zwei Hauptmechanismen der Wasserschädigung identifiziert:

1. der schnell wiederholt in der Praxis auftretende Porenwasserdruck
2. die kontinuierliche und über längere Zeit vorhandene Sättigung mit Wasser ohne Druck

Die Arbeit von Birgisson konzentrierte sich auf den zweiten Hauptmechanismus. Dabei zeigte sich, dass grobes Mischgut eine höhere Wasserdurchlässigkeit aufwies als feines. Entsprechend war es schwieriger, beim feinen Mischgut eine Wassersättigung zu erreichen. Nach der Konditionierung und dem anschliessenden Aufspalten der Prüfkörper wurden bei feinem Mischgut hoher Dichte häufig kohäsive Brüche zwischen den Zuschlagstoffen festgestellt, während dieser Effekt beim groben Mischgut kaum beobachtet wurde.

Es zeigte sich, dass die Struktur der Zuschlagstoffe die Grösse der Änderung der Kohäsionseigenschaften in der Mischung stark beeinflusst. Um den Einfluss der Zusammensetzung der Zuschlagstoffe erfassen zu können, wurde das Verhältnis zwischen dem Modul in konditioniertem und unkonditioniertem Zustand während 24h für die drei Mischgutsorten C1, C2 und C3 mit den Wasserpermeabilitäten 72.37, 64.24 und 29.39 [$\cdot 10^{-5}$ cm/s] verfolgt (Abbildung 4. 2). Neun Prüfkörper aus jedem Mischgut wurden mittels AASHTO T-283 Prozedur [2] konditioniert. Aus den Ergebnissen folgt, dass feinkörniges Mischgut genau so schwer zu trocknen wie zu sättigen ist. Somit kann feinkörniges Mischgut, wenn einmal Wasser aufgenommen worden ist, eine höhere Wasserempfindlichkeit aufweisen als grobkörniges. Schlussendlich unterstreichen die Ergebnisse, dass die Zeit zwischen dem Ende der Konditionierung und der Prüfung einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse ausüben kann.

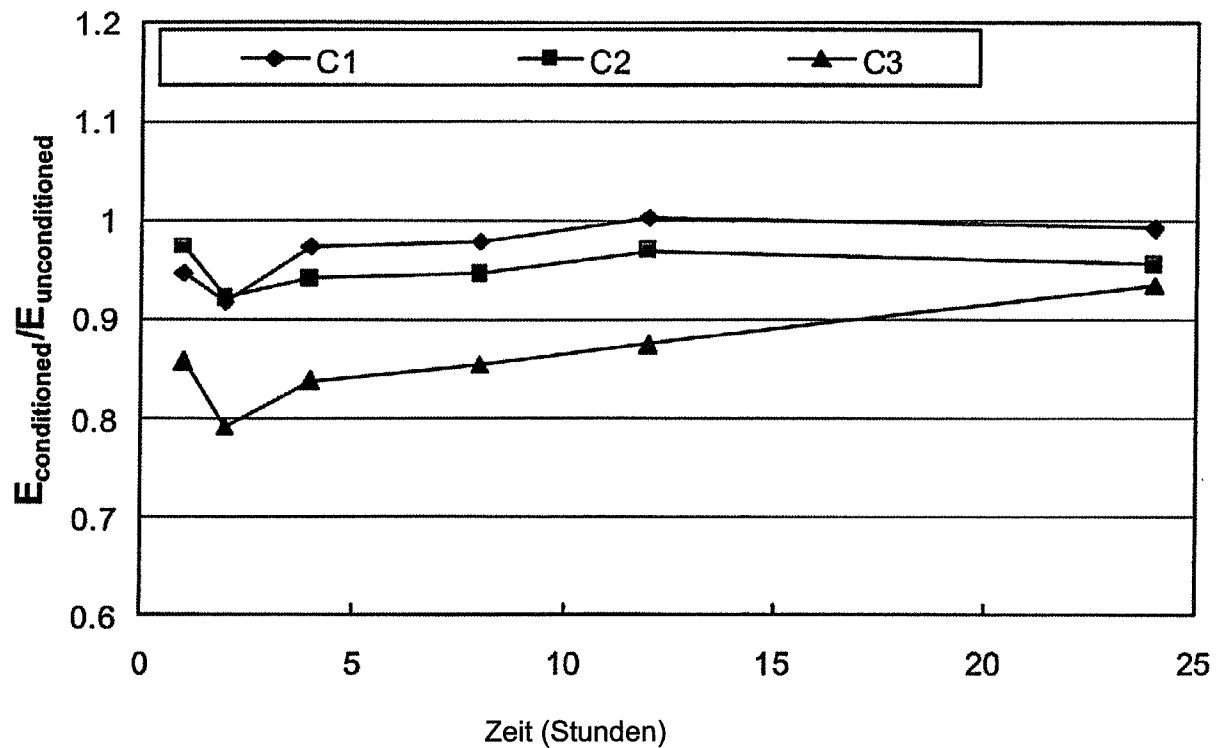


Abbildung 4. 2 Änderung des dynamischen Moduls von drei Mischgutsorten C1, C2 und C3 aus Kalkstein während 24 Stunden mit den Wasserpermeabilitäten 72.37, 64.24 and 29.39 ($\cdot 10^{-5}$ cm/s) [9].

Das Beispiel in Abbildung 4.3 verdeutlicht, dass ein direkter Zusammenhang zwischen dem komplexen Modul (E^*) und dem Sättigungsgrad besteht. Abbildung 4.3 zeigt, dass für Sättigungsgrade über 70% deutlich ausgeprägtere Unstetigkeiten in den Kurven zu sehen sind, was darauf hinweist, dass die Messgenauigkeit in diesem Bereich abnimmt.

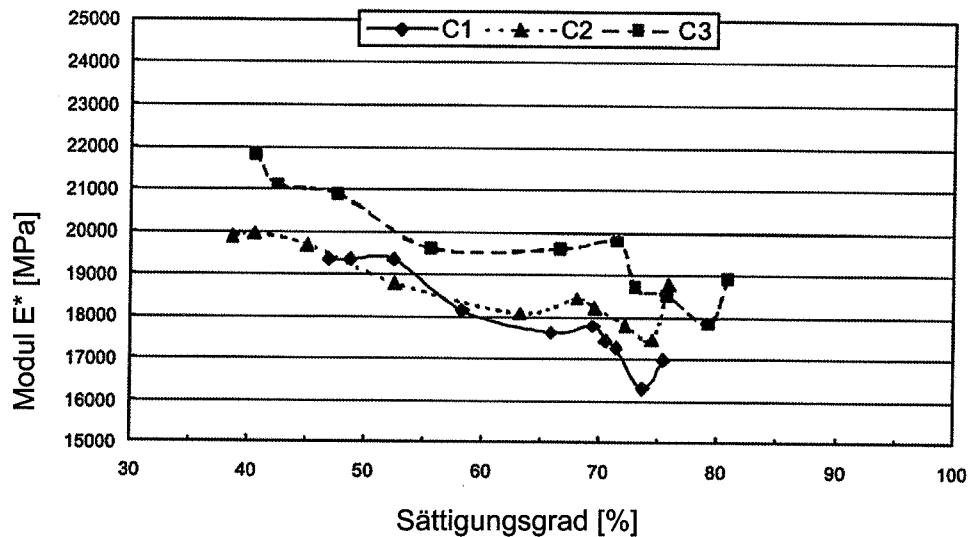


Abbildung 4. 3: Variationen des Moduls (E^*) in Funktion des Sättigungsgrads für drei Mischgutsorten C1, C2 und C3 mit den Wasserpermeabilitäten 72.37, 64.24 und 29.39 ($\cdot 10^{-5}$ cm/s) [9]

Wilhelmi und Schulze [10] haben zudem nachgewiesen, dass sich trotz unbeschädigten Bindemittelfilmen zwischen Bindemitteln und Gesteinen eine dünne Wasserschicht bilden kann, welche die Adhäsion zwischen Bitumen und Gestein stark beeinträchtigt. Das Wasser dringt entweder durch den Bindemittelfilm hindurch oder steigt aus den vor dem Einbau ungenügend getrockneten Zuschlagstoffen auf. Nach Majidzadeh [15] tritt diese Erscheinung besonders häufig bei quarz- und feldspathhaltigen Gesteinen auf. Dabei neigt hochviskoses Bindemittel eher zu derartigen Ablösungsvorgängen. Unabhängig davon, auf welche Weise das Wasser die Bindung zwischen Bindemitteln und Gestein beeinträchtigt, macht sich der Wassereinfluss in einem Festigkeitsabfall beim bituminösen Mischgut bemerkbar. Weitere Forschungen bei NCAT (US National Center for Asphalt Technology) unter dem SHRP A-003B Projekt zeigen, dass die physiochemischen Eigenschaften der Oberfläche der Mineralstoffe eine grössere Rolle bei der Wasserschädigung spielen als die Eigenschaften des Bindemittels [11]. Zudem wird darauf hingewiesen, dass ungenügender Wasserabfluss bei gleichzeitigen Verkehrseinwirkungen grossen Druck in Hohlräumen bewirkt, der die Adhäsionskraft zwischen Bindemittel und Zuschlagstoffen beeinträchtigt und zu Bindemittelablösungen führt. Dabei ist gemäss Kandahl et al [11] zu berücksichtigen, dass durch Kapillarwirkung das Wasser aus den unteren Schichten der Belagsstruktur bis zu einem Punkt aufsteigt, wonach sich das Wasser als Dampf bewegt. Dies führt dazu, dass die Poren durch Wasserdampfkondensation gesättigt werden. Steigende Temperaturen nach der Sättigung bewirken eine

entsprechende Ausdehnung des eingeschlossenen Porenwassers und damit verbunden einen erhöhten Porendruck, der die Adhäsion zwischen Bindemittel und Zuschlagstoffen übersteigt und sich in Bindemittelablösungen äussert.

Choubane [12] weist in Laborprüfungen nach, dass das Wasser mit unerwünscht hoher Geschwindigkeit in Hohlräume eindringen und interne Strukturen der Prüfkörper verändern kann, sobald die Druckabnahme sowie das Endvakuum nicht kontrolliert und spezifiziert werden. Es wird daher vorgeschlagen, eine normierte Methode zu benützen, wobei gleiches Endvakuum und gleiche Lagerdauer der Prüfkörper angestrebt werden müssen.

Mit der Frage der Lagerungstemperatur und -zeit haben sich Ishaï et al [13] genauer beschäftigt. Es wurde eine Prüfungsmethode entwickelt, welche sich für die Bestimmung der Wasserempfindlichkeit unter warmen und feuchten Klimabedingungen eignet. Folgende zwei Fälle wurden untersucht:

- Der erste Fall diente zur Beurteilung der Wasserempfindlichkeit mittels Langzeitdauerhaftigkeitskurven. Dabei wurde die Änderung der Spaltzugfestigkeit nach einer Heisslagerung bei 60°C über einen Zeitraum von 14 Tagen ermittelt (siehe Abbildung 4. 4). Ebenfalls angegeben ist der Wert K, welcher die Geschwindigkeit der Schädigungszunahme beschreibt.
- Der zweite untersuchte Fall ist ähnlich wie der erste, doch wurde die Lagerungszeit auf 6 Tage reduziert. Beide Methoden führten zu einer aussagekräftigeren Bestimmung der Wasserempfindlichkeit als mit der traditionellen, eintägigen Marshall-Wasserlagerung.

$$RS_T = 100e^{-KT} \quad (4.1)$$

wobei:

RS= Retained Strength, Verbleibende Spaltzugfestigkeit, (%)

T= Anzahl Tage

K= Konstante, die die Geschwindigkeit der Schädigungszunahme definiert

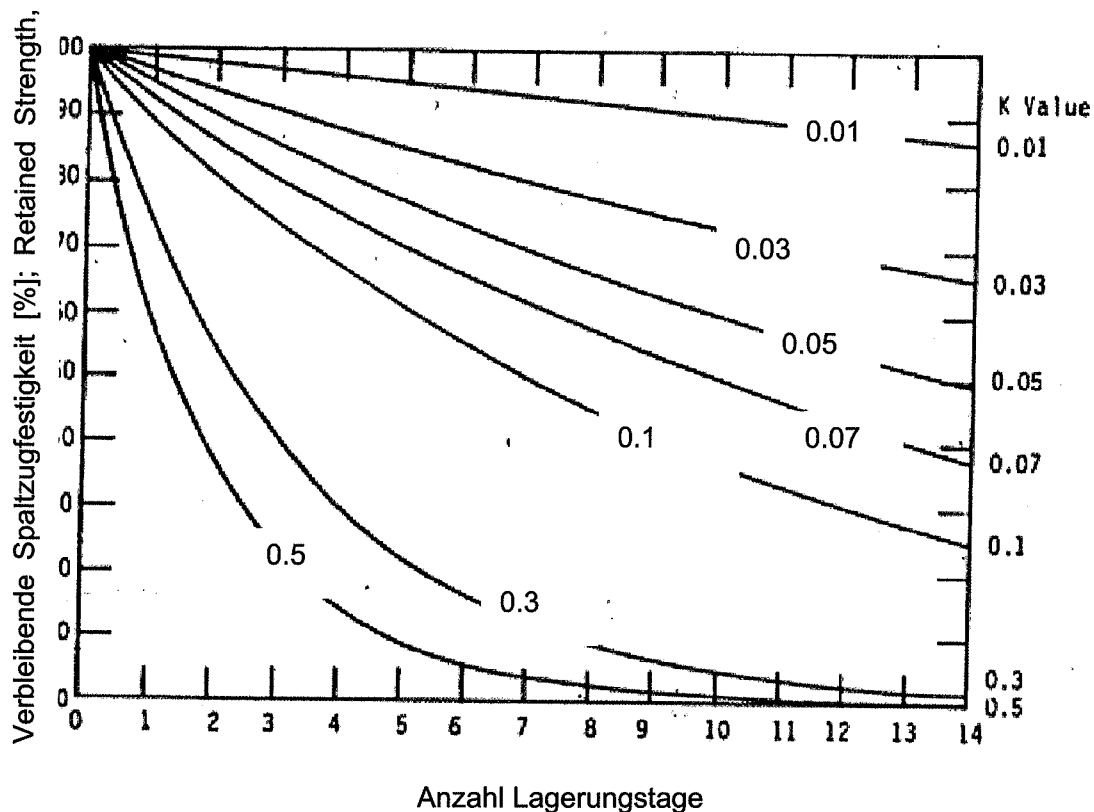


Abbildung 4. 4: Theoretische Kurven der Spaltzugfestigkeit nach einer Lagerung bei 60°C über einen Zeitraum von 14 Tagen. Der Wert K, beschreibt die Geschwindigkeit der Schädigungszunahme [13].

Der Einfluss von periodisch auftretendem Kontakt mit Wasser (z.B. Regen) verglichen mit einer langzeitigen Benetzung mit Wasser, z.B. in Fällen von Überflutungen, wurden von Fwa et al untersucht [14]. Dabei ergab sich, dass bei einer Langzeitbenetzung von den Prüfkörpern mehr Wasser aufgenommen wurde als bei einer wiederholten Nass-Trocken-Konditionierung während 2 Stunden. Die erste Methode (Langzeitbenetzung) lieferte einen Wassersättigungsgrad von 55.6%, die zweite (Nass-Trocken-Konditionierung) einen solchen von nur 32.0%. Das Hauptergebnis verdeutlicht den klar unterschiedlichen Einfluss auf den Belag bei gelegentlicher Einwirkung von Regen, Grundwasser oder Überflutung.

Eine Studie von Mallik et al [16] zeigt, dass der hydraulischen Abrieb in den Poren (Englisch: Hydraulic scouring) durch wiederholt produzierten Wasserdruck in den Poren die primäre Ursache von Wasserschäden in bituminösem Mischgut ist. Mit einer neuen Methode, welche den hydraulischen Abrieb in den Poren mittels wiederholten Porendruck bestimmt, wurde bestätigt, dass der Porendruck bei gesättigten Poren bedeutend grösser ist als bei ungesättigten.

4.2 Stand der Normung

Die Durchführung der Wasserempfindlichkeitsprüfungen gemäss SN [29], EN [4] und ASTM [1] ist ähnlich. Beispielsweise sind in der Schweizer Norm die Prüfkörper in zwei Teilsereien „nass“ und „trocken“ mit ähnlicher, mittlerer Höhe (maximale Abweichung 5mm) und ähnlicher mittlerer Rohdichte (maximale Abweichung 0.03 g/cm^3) zu unterteilen und danach wie in Tabelle 4.1 zusammengefasst zu prüfen. Die Detailprüfmethoden wurden in [3] schon ausführlich diskutiert. Dieser Bericht konzentriert sich auf die in Tabelle 4.1 speziell markierte Sättigungsmethode. Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Normen bezüglich der Sättigungsmethoden enthalten die folgenden Abschnitte.

Tabelle 4. 1: Ablauf der Wasserempfindlichkeitsprüfung gemäss SN 640 452c [29]

| Marshall Prüfkörper | |
|--------------------------------------|--|
| Teilserei "trocken": 3 Prüfkörper | Teilserei "nass": 3 Prüfkörper |
| - | Sättigung: minimaler Sättigungsgrad 55..80Vol% |
| - | Lagerung: 24h bei 60°C |
| Konditionierung: trocken bei 25°C | Konditionierung: nass bei 25°C |
| 20 Min. | 60 Min. |
| Spaltzug bei 25°C | |

4.2.1 Sättigung gemäss Schweizer Norm SN 640 452c [29]

Der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Festigkeitseigenschaften im Eignungsnachweis ist nach Norm mit dem Spaltzugversuch zu untersuchen. In der Schweizer Norm existiert zwar eine Anforderung, doch ist die Sättigungsmethode bisher nicht genau definiert worden. Die Teilsereien für die Wasserlagerung sind zunächst mit total entsalztem Wasser bei Raumtemperatur zu sättigen, wobei der Sättigungsgrad zwischen 55% und 80% zu betragen hat. Dies kann in etwa 5 Minuten und mit einem Vakuum von etwa 67kPa (661mbar) erzielt werden. Beim Erreichen höherer Sättigungsgrade sind die Prüfkörper als beschädigt zu betrachten

und zu entsorgen. Sofern die vorgeschriebene Mindestsättigung von 55% nicht erreicht wird, ist hauptsächlich die Intensität des Vakuums und nicht die Lagerungsdauer zu überprüfen. Anschliessend sind die Prüfkörper während 24h bei 60°C, Toleranz $\pm 1^\circ\text{C}$ und danach während 1h bei 25°C in total entsalztem Wasser zu lagern. Die Höhe der Marshall-Prüfkörper und der zu erreichende Sättigungsgrad sind vorgängig zu bestimmen.

4.2.2 Sättigung gemäss Amerikanischer Norm ASTM [1]

Die Prüfung nach ASTM D 4867-96 ist mit der Prüfung AASHTO T 283-85 [2] nahezu identisch. Sie wird an Prüfkörpern aus Asphaltbeton mit dichter Struktur und einem nominellen Grösstkorn von 2mm bis 50mm durchgeführt. In einem ersten Schritt werden die Prüfkörper in destilliertem Wasser bei Raumtemperatur gesättigt. Kann der minimale Sättigungsgrad von 55% nicht erreicht werden, darf das Wasser bis 60 °C aufgeheizt werden. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass in AASHTO T283-85 ein Sättigungsgrad von 70% bis 80% gefordert wird. In einem zweiten Schritt erzeugt man während 5 Min. ein Absolutvakuum von 70kPa (691mbar). Dabei wurde darauf hingewiesen, dass der Sättigungsgrad stark vom Vakuum und nicht von der Zeit abhängt. Das Volumen des gesättigten Prüfkörpers wird gemäss Testmethode D2726 [23] berechnet. Dabei ergibt sich das Volumen des Wassers durch Subtraktion der gesättigten Masse von der Prüfkörpermasse. Um den Sättigungsgrad zu erhalten, teilt man das absorbierte Wasservolumen durch den Hohlraumgehalt.

4.2.3 Sättigung gemäss der Europäischen Norm EN 12697-12 [4]

Eine Europäische Norm über die Wasserempfindlichkeit ist in der Entstehungsphase. Diese Norm beschreibt ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Einflusses der Wassersättigung und der beschleunigten Klimatisierung durch Wasserlagerung auf die indirekte Zugfestigkeit von zylindrischen Asphalt-Probekörpern. Im folgenden wird der Wassersättigungsteil der Norm kurz vorgestellt.

Die Probekörper der nassen Teilgruppe sind auf den Zwischenboden der Vakuumkammer zu legen, die mit destilliertem und auf $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ temperiertem Wasser derart gefüllt ist, dass sich die Oberseiten der Prüfkörper mindestens 20mm unterhalb der Wasseroberfläche befinden. Die Vakuumkammer ist innerhalb von (10 ± 1) min auf einen absoluten (Rest-)Druck von $(6.7\pm 0.3)\text{kPa}$ (66mbar) zu evakuieren. Der Druck ist langsam zu verringern, so dass die Prüfkörper nicht durch die Ausdehnung beschädigt werden. Das Vakuum ist während (30 ± 5) min lang aufrechtzuerhalten. Danach ist in der Vakuumkammer langsam wieder der atmosphärische Druck aufzubauen. Die Prüfkörper sind weiter während (30 ± 5) min vollständig im

Wasser eingetaucht zu lagern. Die Masse der Prüfkörper ist nach Norm zu messen. Das Volumen der Prüfkörper ist zu berechnen. Alle Prüfkörper, deren Volumen um mehr als 2% zugenommen haben, sind zu entsorgen.

Es ist wichtig zu bemerken, dass es in den Europäischen Normen keine Anforderung für einen minimalen Wassersättigungsgrad gibt.

5 FORSCHUNGSPROGRAMM

Da die vorliegende Arbeit eine Ergänzung zu [3] darstellt, wurden sämtliche Prüfungen mit gleichen Materialien durchgeführt.

Gemäss der in Kapitel 2 formulierten Aufgabenstellung waren sowohl HMF22, HMF32 als auch HMT22 zu untersuchen. Es wurde nur die HMF untersucht, weil die beiden Mischgutarten sich bezüglich den relevanten Grössen nur unwesentlich unterscheiden. Beispielsweise beträgt der Sollwertbereich für den Hohlraumgehalt 4...9Vol% für HMF22 und 3...6Vol% für HMT 22. Der maximal zulässige Fließwert „Marshall“ beträgt 1.5...4mm für HMF und 1.5...3.5mm für HMT. Der Sollwertbereich des Anteils an löslichem Bindemittel wird mit 4.0...4.2 Masse% (HMT) und mit zwischen 3 ...4 Masse% (HMF) angegeben [28,29]. Die HMF wurde ausgewählt, weil sie wegen den tieferen Bindemittelgehalt wasserempfindlicher ist. HMF32 wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, weil der Trend in der Praxis zu eher kleineren Korngrössen besteht; deshalb wurde HMT16 untersucht. Zusätzlich erlauben ASTM und EN für Marshall-Prüfkörper keine Korngrösse von 32mm.

Eine untere Grenze des Wassergehalts im Prüfkörper ist nötig, um eine schädigende Wirkung des Wassers zu erzeugen. Die in diesem Bericht diskutierte Methode verlangt deshalb einen minimalen Sättigungsgrad.

Tabelle 5. 1: Kurzfassung des Forschungsprogramms (Siehe Tabelle 7.1)

| Programm | Sättigungsvariante | Ergebnisse |
|-----------------|---------------------------|---|
| 1. Schritt | sv:a bis sv:g | nur sv:f und sv:g erwiesen sich als sinnvoll siehe Abschnitt 7.1 |
| 2. Schritt | sv:f, sv:g, sv:h | siehe Abschnitt 7.4 |

In einem ersten Schritt wurde nach verschiedenen Methoden untersucht, in wie weit ein Sättigungsgrad innerhalb der in der Norm [1, 29] vorgeschriebenen Grenzen von 55 Vol.-% und 80 Vol.-% erreicht werden kann. Um zu kontrollieren, ob der Sättigungsgrad innerhalb der Normgrenzen liegt, wurde zunächst die Menge an absorbiertem Wasser ermittelt, indem die Prüfkörper nach der Sättigung aus dem Behälter herausgenommen und auf eine Waage gelegt wurden (Vorgehensweise ASTM [1]). Wie in der ASTM vorgeschlagen, wurden dabei die Prüfkörper leicht mit einem Tuch abgewischt, obwohl dadurch, wie bereits in [3] abgeklärt, der Sättigungsgrad in den meisten Fällen als zu tief ermittelt wurde.

Wie in Tabelle 5.1 angegeben wird, umfasst das Prüfprogramm in einem ersten Schritt verschiedene Sättigungsvarianten und in einem zweiten Schritt ausgewählte Verfahren. Eine detaillierte Beschreibung der Prüfmethode ist in Abschnitt 7 enthalten.

6 MATERIALIEN UND EIGENSCHAFTEN

6.1 Verdichtung Marshall

Weil schon anderweitig gezeigt wurde, dass Schlagzahlen von über 50 Schlägen einen geringen Einfluss auf die Verdichtung und den Hohlraumgehalt von Marshall-Prüfkörpern haben [24], wurde für diese Untersuchungen eine konstante Schlagzahl von 50 Schlägen gewählt.

6.2 Materialwahl

Es wurden sechs verschiedene HMF aus Mischwerken in der Deutschschweiz ausgewählt, wobei darauf geachtet wurde, dass verschiedene Mischgutsorten (HMF16, HMF22) aus neuwertigen Komponenten, aber auch solche mit unterschiedlichen Recycling Materialien, einbezogen wurden. Zudem wurden verschiedene Bindemittelsorten sowie –dosierungen berücksichtigt. Die gewählten HMF sollten eine möglichst grosse Spannbreite innerhalb der nach Norm definierten Grenzwerte des Soll-Hohlraumgehaltes umfassen. Zusätzlich wurde ein AB11S zu Vergleichszwecken gewählt. Wichtige Kenndaten der untersuchten Materialien, inklusive Korngrößenverteilungen, sind in Tabelle 6. 1, Tabelle 6.2, Tabelle 6.3, Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 dargestellt.

Tabelle 6. 1: Wichtige Kenndaten der untersuchten Materialien 1...7 (EMPA interne Prüfkörperbezeichnung in Klammern) nach [3]

| Nr. | Mischgut-Sorte | Recycling-Material [%] | | | Haftvermittler [%] | Bindemittel | | | HM soll [%] |
|-----|---------------------|------------------------|----|------|--------------------|------------------|---------|------------|-------------|
| | | A-Gr. | RM | Glas | | Bindemittelsorte | | I. A. soll | |
| | | | | | | gesamt | neu | | |
| 1 | AB11S | | | | * | B55/70 | | * | * |
| 2 | HMF22 (BBR22A) | 40 | 40 | | - | ca. B80/100 | 180/220 | 3.5 | 5.9 |
| 3 | HMF16 (BBR16) | | | 30 | 0.2 | B80/100 | 80/100 | 3.4 | 7.5 |
| 4 | HMF22 (BBR22G) | 30 | | | 0.11-0.2 | ca. B80/100 | 300 | 3.1 | 8 |
| 5 | HMF22 (BBR22G+A) | 30 | | 22.5 | 0.11-0.2 | ca. B80/100 | 300 | 3.1 | 8 |
| 6 | HMF22 (A1) | | | 22.5 | 0.2 | B80/100 | 80/100 | 3.1 | 8 |
| 7 | HMF22 (BE22) | | | | * | B80/100 | 80/100 | 4.4 | 7...9 |

(*)keine Angaben, (-) keine Haftvermittler; A-Gr.: Asphalt-Granulat, RM: Recycling-Mineral, I.A. Anteil an löslichem Bindemittel, HMF: Heissmischfundationsschicht
Empa-interne Prüfkörperbezeichnung in Klammer

Tabelle 6. 2 Korngrößenverteilungen der Materialien

| Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------------|---------------------|--------|-------|--------|----------|-------|-------|
| Mischgut-Sorte | AB11S | HMF22 | HMF16 | HMF22 | HMF22 | HMF22 | HMF22 |
| EMPA Interne Bezeichnung | - | BBR22A | BBR16 | BBR22G | BBR22G+A | A1 | BE22 |
| Prüfsieb [mm] | Durchgang [Masse-%] | | | | | | |
| 31.5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 22.4 | 100 | 100 | 100 | 98 | 99 | 98 | 97 |
| 16 | 100 | 88 | 100 | 89 | 94 | 92 | 88 |
| 11.2 | 96 | 81 | 90 | 77 | 83 | 80 | 72 |
| 8 | 80 | 74 | 81 | 66 | 74 | 70 | 64 |
| 5.6 | 66 | 66 | 68 | 58 | 63 | 60 | 56 |
| 4 | 58 | 58 | 62 | 50 | 56 | 53 | 49 |
| 2.8 | 47 | 50 | 55 | 42 | 48 | 45 | 42 |
| 2 | 37 | 44 | 48 | 36 | 42 | 39 | 36 |
| 1.5 | 31 | 38 | 42 | 32 | 37 | 34 | 31 |
| 1 | 24 | 32 | 35 | 27 | 31 | 29 | 26 |
| 0.75 | 21 | 28 | 30 | 23 | 26 | 25 | 22 |
| 0.5 | 17 | 23 | 24 | 19 | 22 | 21 | 19 |
| 0.375 | 15 | 20 | 19 | 17 | 18 | 17 | 15 |
| 0.25 | 12 | 17 | 15 | 14 | 14 | 14 | 12 |
| 0.1875 | 10 | 15 | 13 | 12 | 12 | 12 | 10 |
| 0.125 | 8 | 13 | 11 | 11 | 11 | 11 | 8 |
| 0.09 | 7 | 12 | 9 | 9 | 9 | 9 | 7 |

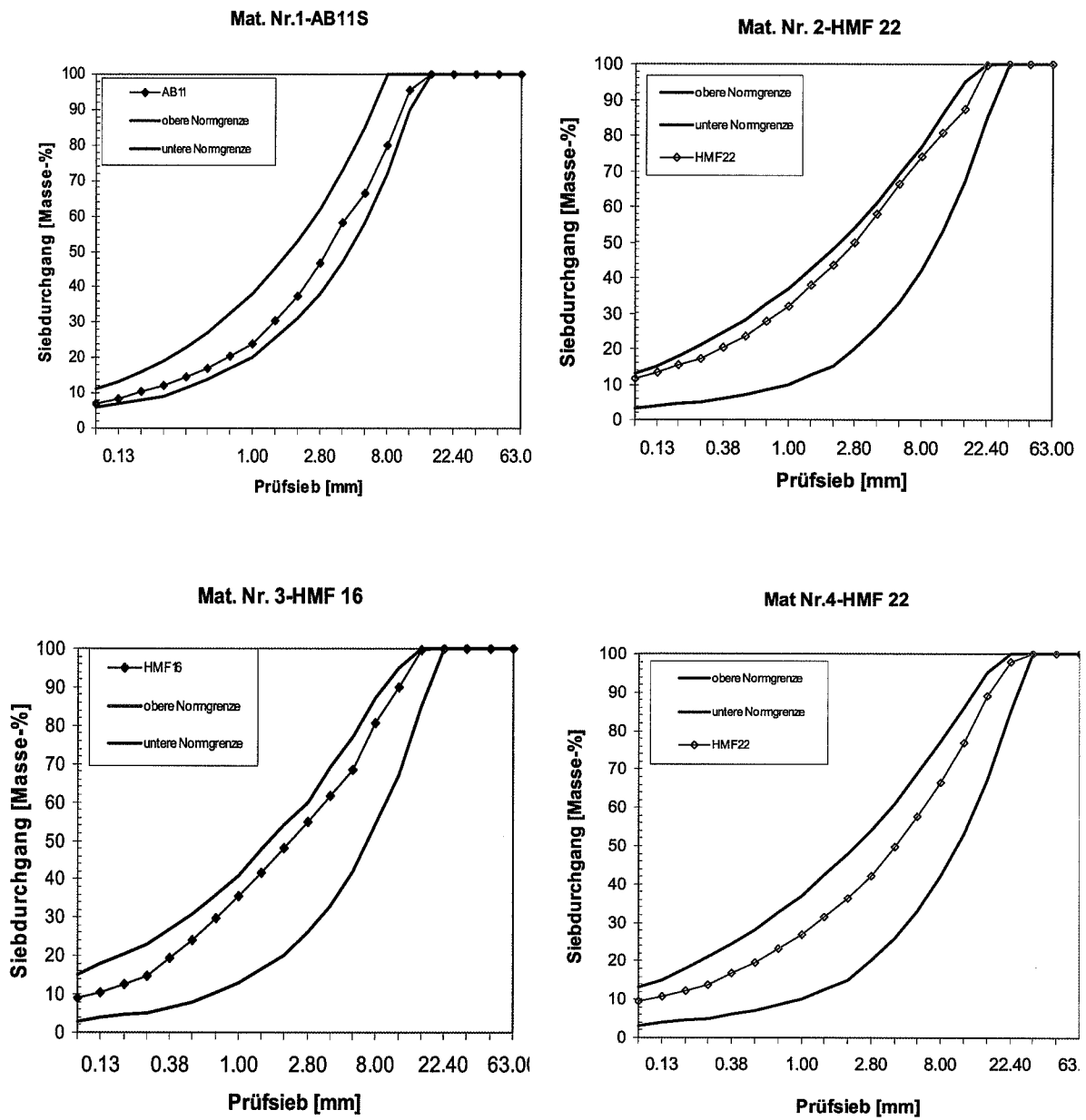


Abbildung 6. 1: Korngrößenverteilungen der Materialien 1 bis 4

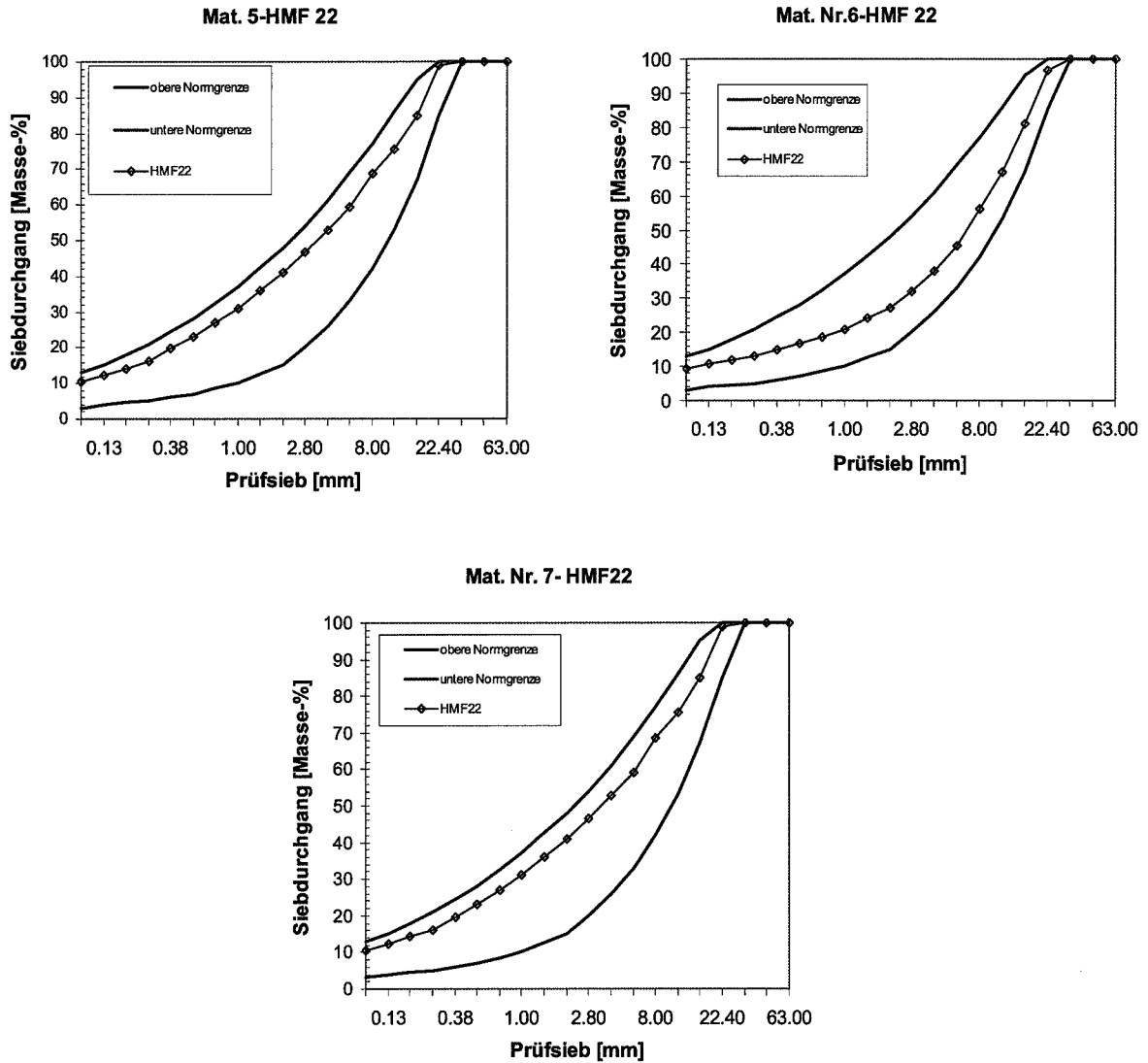


Abbildung 6. 2: Korngrößenverteilungen der Materialien 5 bis 7

6.3 Bestimmung von Dichte, Rohdichte und Hohlraumgehalt

Von jedem Mischgut wurden drei Prüfkörper hergestellt. Dichte [30], Rohdichte [31] und Hohlraumgehalt [31] wurden nach Schweizer Norm und gemäss Abschnitt 3.2 untersucht.

Tabelle 6. 3: Dichte, Rohdichte und Hohlraumgehalt (EMPA interne Bezeichnung in Klammern)

| Nr. | Mischgut | Dichte [t/m ³] | Rohdichte [t/m ³] | Hohlraumgehalt [Vol%] |
|-----|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 1 | AB11S | 2.491 | 2.352 | 5.58 |
| 2 | HMF22 (BBR22A) | 2.536 | 2.319 | 8.56 |
| 3 | HMF16 (BBR16) | 2.495 | 2.277 | 8.74 |
| 4 | HMF22 (BBR22G) | 2.502 | 2.327 | 6.99 |
| 5 | HMF22 (BBR22G+A) | 2.508 | 2.312 | 7.81 |
| 6 | HMF22 (A1) | 2.452 | 2.222 | 9.38 |
| 7 | HMF22 (BE22) | 2.548 | 2.329 | 8.59 |

7 SÄTTIGUNGSUNTERSUCHUNG

Wasser kann in Laborversuchen mittels drei verschiedenen Verfahren in Prüfkörper eingebracht werden [21]:

1. Druck
2. Vakuum
3. statische Sättigung

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass eine untere Grenze des Wassergehalts im Prüfkörper nötig ist, um eine schädigende Wirkung des Wassers zu erzeugen. Die in diesem Bericht diskutierte Methode verlangt deshalb ein gewisses Sättigungsniveau. Um einen Sättigungsgrad vor der Konditionierung zu schaffen, wird Vakuum oder Druck eingesetzt. Bei statischen Sättigungen dringt dagegen während der Konditionierung das Wasser von selbst in den Prüfkörper ein.

7.1 Evaluation verschiedenen Sättigungsmethoden- 1.Schritt

Der Sättigungsgrad nach Kapitel 4 wurde unter der Voraussetzung berechnet, dass die aus drei Prüfkörpern berechneten Werte ρ_R und HM für das ganze Material gelten und die Temperaturabhängigkeit der Wasserdichte unerheblich sei.

Wie schon in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, haben sich verschiedene Wissenschaftler wie Ishai et al [13] und Fwa et al [14] genauer mit der Frage der Lagerungstemperatur und -zeit auseinandergesetzt. Sowohl von Ishai als auch von Fwa ist mit einer Lagerungszeit von 14 Tagen der erwünschte Sättigungsgrad besser erreicht worden als mit einem Tag. Doch ist für eine Routineprüfung die lange Lagerungszeit von z.B. 14 Tage als unpraktisch einzustufen.

7.1.1 Prüfbedingungen

Der Sättigungsgrad wurde normkonform nach ASTM [1], SN [29] und prEN [4] jeweils an drei Prüfkörpern pro Mischgutsorte ermittelt. Der Sättigungsgrad für die Sättigungsvarianten sv:a bis sv:h wurde wie folgt bestimmt:

Prüfbedingungen nach ASTM [1], sv:a, sv:b, sv:c**sv:a)**

Die Prüfkörper wurden nach [1] bei Raumtemperatur (20°C) bei 2cm bis 3cm Überdeckung mit entsalztem Wasser 5 Minuten lang gesättigt. Zur Kontrolle, ob der partielle Sättigungsgrad innerhalb der Normgrenzen liegt, wurde die Menge an absorbiertem Wasser ermittelt. Hierzu wurden die Prüfkörper nach der Sättigung aus dem Behälter herausgenommen und auf eine Waage gelegt. Danach wurden die Prüfkörper leicht abgetrocknet.

sv:b)

Die Prüfkörper wurden bei 2cm bis 3cm Überdeckung mit entsalztem, 60°C warmem Wasser während 5 Minuten gesättigt. Dieses Vorgehen wird angewendet, wenn der Sättigungsgrad von sv:a nicht innerhalb der in der Norm [1, 29] vorgeschriebenen Grenzen von 55Vol% und 80Vol% liegt.

sv:c)

Die Prüfkörper wurden bei 2cm bis 3cm Überdeckung mit entsalztem Wasser bei Raumtemperatur unter 700mbar ($\approx 70\text{kPa}$) Druck gesättigt. Dieses Vorgehen wird angewendet, wenn der Sättigungsgrad von sv:b nicht innerhalb der in der Norm [1, 29] vorgeschriebenen Grenzen von 55Vol% und 80Vol% liegt.

Prüfbedingungen nach SN [29], sv:d, sv:e, sv:f**sv:d)**

Die Prüfkörper wurden in entsalztem Wasser bei Raumtemperatur und 670mbar ($\approx 67\text{kPa}$) Druck nach [29] gesättigt.

sv:e)

Um den Wasserverlust zu minimieren, wurde zusätzlich zur SN Norm [29] ein wasserfestes Klebeband auf der Seite und der unteren Flächen aufgeklebt.

sv:f)

Die Prüfkörper wurden in entsalztem Wasser bei Raumtemperatur und 670mbar Druck nach [29] gesättigt. Zusätzlich wurden die Prüfkörper mit jenem Wasserbehälter, worin sie gesättigt worden waren, direkt in das Wasserbad der Tauchwägung eingetaucht. Auf diese Weise wurde der Verlust von Wasser aus den gesättigten Hohlräumen verhindert und der Sättigungsgrad etwas genauer ermittelt [3].

Prüfbedingungen nach EN [4], sv:g, sv:h**sv:g)**

Gemäss Europäischer Norm wurden die Prüfkörper bei der Durchführung der Teilserie „nass“ unter Vakuum gesetzt, um einen absoluten Druck von 6.7kPa – 7.0kPa (67mbar - 70mbar) in 10 bis 11 Minuten zu erreichen. Dieser Druck wurde während 30 bis 35 Minuten aufrecht erhalten, um ein langsames Anpassen an den atmosphärischen Druck zu ermöglichen. Zudem wurden die Prüfkörper während 30 bis 35 Minuten im Wasser gelagert. Bei diesen Untersuchungen wurde zwar versucht, einen Druck nach EN [4] von 67mbar aufzubauen, doch konnte mit einem üblicherweise in der Praxis eingesetzten Gerät nur ein Druck von 300mbar erreicht werden. Deshalb wurden bei diesen Versuchen die Prüfkörper bei Raumtemperatur (20°C) bei 2cm bis 3cm Überdeckung mit entsalztem Wasser und mit 300mbar Druck gesättigt.

sv:h)

Dies entspricht der Sättigungsvariante g unter Wasser. Das heisst, wie bei Methode sv:f wurden die Prüfkörper in entsalztem Wasser bei Raumtemperatur und 300mbar Druck nach [29] gesättigt. Zusätzlich wurden die Prüfkörper mit jenem Wasserbehälter, worin sie gesättigt worden waren, direkt in das Wasserbad der Tauchwägung eingetaucht. Der Verlust von Wasser aus den gesättigten Hohlräumen wurde so verhindert und der Sättigungsgrad etwas genauer ermittelt.

Der Sättigungsgrad (Mittelwert für drei Prüfkörper) wurde nach verschiedenen Methoden mittels der Gleichungen in Abschnitt 3.2.4 berechnet und in Tabelle 7.1 dargestellt.

Tabelle 7. 1: Sättigungsgrad nach verschiedenen Methoden in Vol% (Mittelwert für drei Prüfkörper)

| Sättigungsvarianten | | sv:a | sv:b | sv:c | sv:d | sv:e | sv:f | sv:g |
|---------------------|----------|-------|-------|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------|
| Mischgut | Mischgut | 20°C | 60°C | 700 | 670 | 670 | 670mbar | 300 |
| Nr. | Sorte | 5min | 5min | mbar Druck | mbar Druck | mbar Druck mit Kle- bung | Druck unter Wasser | mbar Druck |
| 3 | HMF16 | 6.75 | 12.13 | 37.9 | 38.76 | 44.4 | 69.8 | 82.0 |
| 6 | HMF22 | 24.37 | 19.69 | 35.1 | 42.45 | 59.2 | 68.89 | 62.0 |

7.1.2 Ergebnisse der Evaluation-1.Schritt

Wie aus Tabelle 7.1 ersichtlich, liegt im Falle der Sättigungsvarianten sv:g und sv:f bei beiden Mischgutsorten der Sättigungsgrad über dem nach ASTM definierten minimalen Sättigungsgrad (55Vol-%). Die Sättigungsvariante sv:e ist auszuschliessen, weil diese Methode nicht in einem zeitlich vernünftigen Rahmen durchgeführt werden kann und die Normgrenze kaum erreicht wird. Deswegen wurden die restlichen Prüfkörper direkt mit 300mbar , 670mbar und 300mbar unter Wasser gesättigt. Eine Zusatzmethode, mit „300mbar unter Wasser“ (sv:h), wurde zu Vergleichszwecken mit sv:g angewandt.

7.2 Überprüfung der ausgewählten Sättigungsverfahren-2.Schritt

Der Sättigungsgrad für verschiedene Mischgutsorten nach den Varianten f, g und h ist in Tabelle 7.2, Abbildung 7.1 und Abbildung 7. 1 dargestellt. Offenbar liegen bei den sv:g die meisten Sättigungsgrade über dem nach ASTM definierten Sättigungsgrad von 55% [1]. Dies gilt auch für die Sättigungsvariante sv:h, mit Ausnahme der Mischgutsorte Nr.1. Bei der Sättigungsvariante f hat fast keiner der Prüfkörper den nach der Norm [1] definierten, minimalen Sättigungsgrad erreicht. Selbst die Resultate der Evaluation in Tabelle 7.1 wurden nicht bestätigt. Der maximale Sättigungsgrad von 80Vol-% wird bei der Sättigungsvariante sv:h von mehreren Prüfkörpern überschritten. Bei Sättigungsvariante g, haben nur die Mischgutsorten Nr.3 und 4 die Anforderung $SGM \leq 80\%$ nicht erfüllt.

Tabelle 7. 2: Sättigungsgrade, SGM verschiedene Mischgut-Materialien (Mittelwert für drei Prüfkörper)

| Sättigungsvarianten(sv) | | | sv:f | sv:g | sv:h |
|-------------------------|---------------------|--------------|--|------------------------|--|
| Nr. | Mischgut Sorte | HM [Vol%] | SGM,670 mbar unter Wasser [Vol%] | SGM,300 mbar [Vol%] | SGM,300 mbar unter Wasser [Vol%] |
| 1 | AB11S | 5.58 | 18.5 | 56.1 | 49.1 |
| 2 | HMF22 (BBR22A) | 8.56 | 52.8 | 72.3 | 82.4 |
| 3 | HMF16 (BBR16) | 8.74 | 46.6 | 83.9 | 77.1 |
| 4 | HMF22 (BBR22G) | 6.99 | 49.3 | 90.7 | 81.9 |
| 5 | HMF22 (BBR22G+A) | 7.81 | 45.0 | 79.1 | 82.1 |
| 6 | HMF22 (A1) | 9.38 | 45.9 | 79.1 | 83.5 |
| 7 | HMF22 (BE22) | 8.59 | 44.8 | 53.8 | 68.6 |

Gemäss [3] war zu erwarten, dass die Prüfkörper der Methode sv:h einen höheren Sättigungsgrad erreichen würden als mit sv:g. Dies ist bei Mischgut Nr. 1 und Nr. 3 nicht der Fall. Vermutlich liegt der Grund in der Berechnung der Hohlraumgehalte und Rohdichten.

Bei den Kennwerten „Hohlraumgehalt“ (siehe Tabelle 6. 3) zeigte sich, dass die ausgewählten Materialien verschieden grosse Hohlraumgehalte aufwiesen. Die Annahme, dass Materialien mit höherem Hohlraumgehalt einen höheren Sättigungsgrad erreichen würden, bestätigte sich aber nicht (Tabelle 7.2).

Wie in Tabelle 7.1 und Abbildung 7.2 ersichtlich, spielen die Sättigungsmethoden bei der Ermittlung des Sättigungsgrades eine wichtige Rolle. Dabei erreichen beispielsweise die verschiedenen Materialien mit einem ungefähren Wert von HM=5.5Vol% und HM=7.0Vol% unterschiedliche Sättigungsgrade. Zusätzlich wird bei gleichen Methoden und fast gleichem HM der Sättigungsgrad durch den Materialtyp kontrolliert.

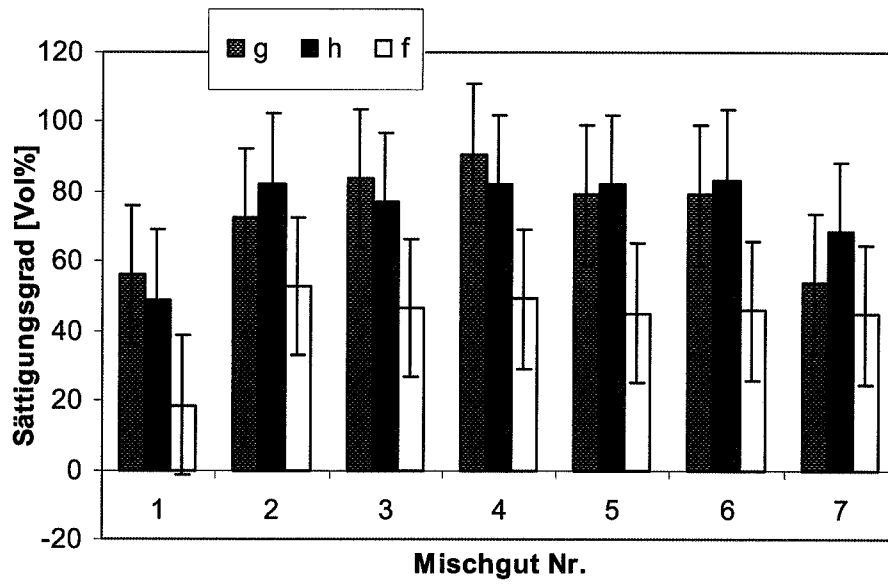


Abbildung 7. 1: Sättigungsgrade nach Methode sv:g, sv:h, sv:f, verschiedene Mischgut-Materialien (Mittelwert für drei Prüfkörper)

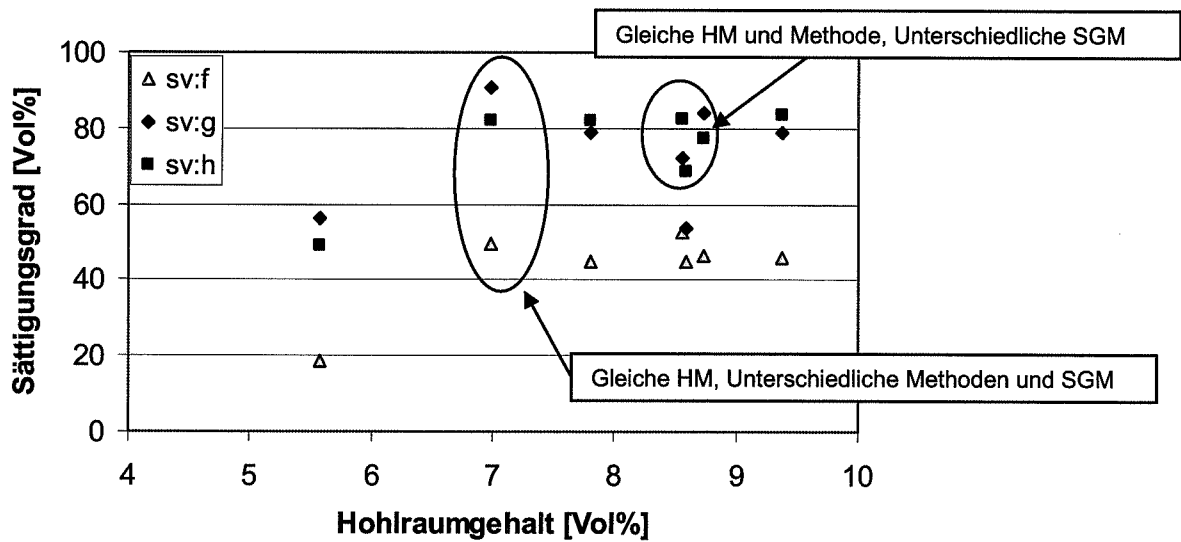


Abbildung 7.2: Sättigungsgrade nach Methode sv:g, sv:h, sv:f, verschiedene Materialien als Funktion des Hohlraumgehaltes

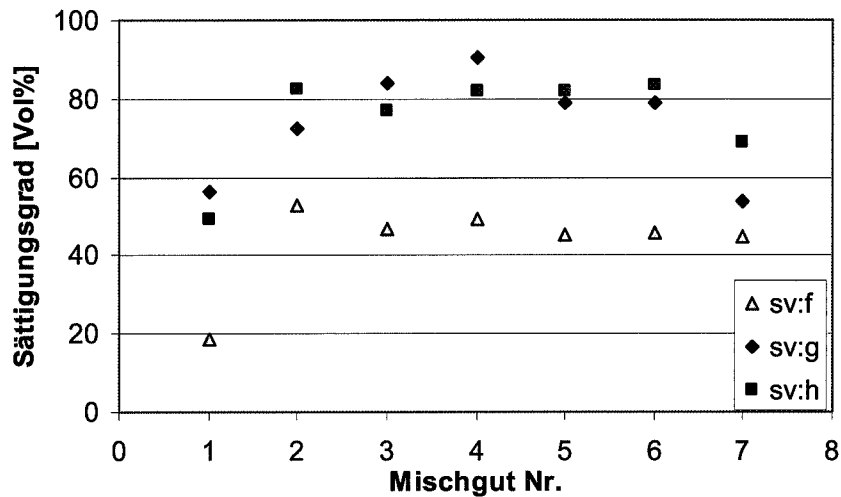


Abbildung 7. 3: Beziehung zwischen Mischgutttyp und Sättigungstyp

Abbildung 7. 3 stellt die Beziehung zwischen Mischgutttyp und Sättigungsgrad für die Sättigungsvarianten g, f und h dar. Es ist klar, dass für sv:g und sv:h ähnliche Sättigungsgrade resultieren. Die Methode sv:g bringt in den meisten Fällen mehr Wasser in die Prüfkörper. Deshalb bringt die Variante sv:h, die eine experimentelle Zusatzarbeit verlangt, keinen Vorteil. Auch ist offensichtlich, dass Mischgut 1, ein AB11, unabhängig von der Sättigungsmethode schwieriger zu sättigen ist.

7.2.1 Wirksamer Sättigungsgrad

Der Sättigungsgrad kann auch berechnet werden, indem man das Volumen des im Prüfkörper vorhandenen Wassers durch das Volumen des Prüfkörpers dividiert. Bei dieser Methode kann der Hohlraumgehalt verschiedener Mischgutvarianten berücksichtigt werden. Der Sättigungsgrad wurde aus dem gesamten Wassergehalt des Prüfkörpers berechnet.

Beispiel: Der Prüfkörper B in Abbildung 7. 4, mit einem Sättigungsgrad von 50% und einem Hohlraumgehalt von 8%, kann doppelt so viel Wasser aufnehmen wie der Prüfkörper A, mit einem Hohlraumgehalt von 4%. Das zusätzliche Wasser und die dünnere Bindemittelschicht können eine grössere Anfälligkeit für Schädigungen bewirken. Der Sättigungsgrad kann somit in Fällen mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt irreführend sein. Stuart empfiehlt, die Sättigung auf das Volumen des Prüfkörpers zu beziehen, wenn der Hohlraumgehalt mehr als 1% schwankt [21]. Der wirksame Sättigungsgrad ist wie folgt zu berechnen:

$$S_{\text{wirk}} = \frac{V_{\text{wasser}}}{V_{\text{mb}}} \cdot 100 \quad [\text{Vol. \%}] \quad (7.1)$$

S_{wirk} wurde in Abbildung 7. 5 und Tabelle 7. 3 im Vergleich mit dem Sättigungsgrad SGM für sv:g dargestellt. Insbesondere in Schadenfällen und in Forschungsprojekten kann der wirk-same Sättigungsgrad in die Beurteilung miteinbezogen werden.

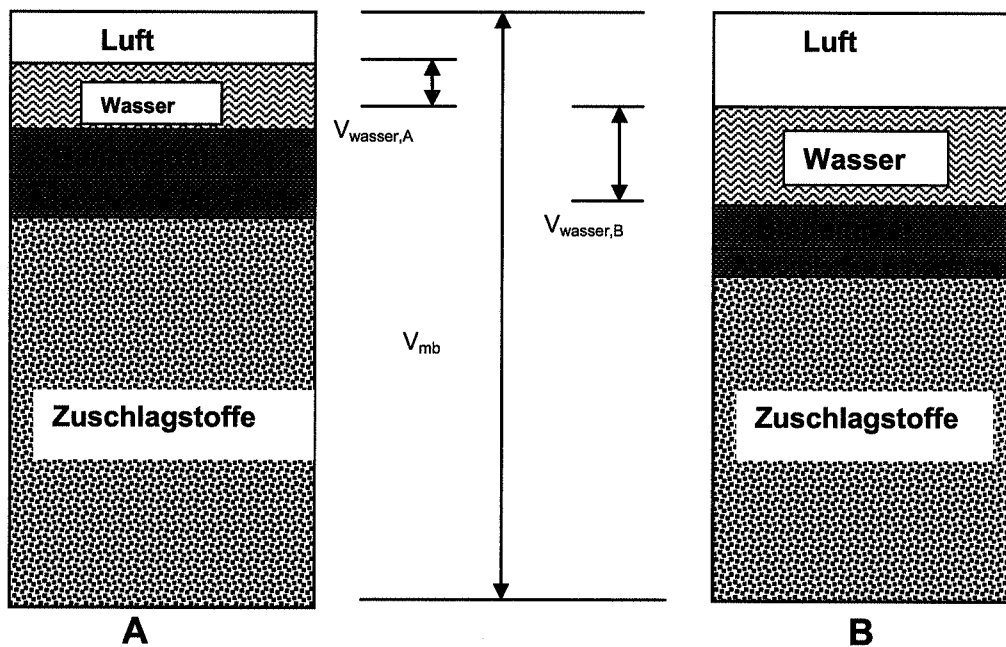


Abbildung 7. 4: Unterschiede des Wassergehaltes bei gleichem Sättigungsgrad (Bei-spiel $SGM=50\%$) $V_{\text{wasserA}}/V_{\text{mb}} \neq V_{\text{wasserB}}/V_{\text{mb}}$

Tabelle 7. 3: Der Unterschied zwischen Sättigungsgrad SGM und wirksamer Sättigungsgrad Swirk

| Nr. | Mischgut Sorte | HM [Vol%] | Sättigungsgrad SGM, sv:g (Gleichung 3.4) | Sättigungsgrad S_{wirk} (Gleichung 7.1) |
|-----|---------------------|--------------|--|--|
| 1 | AB11S | 5.58 | 56.1 | 3.13 |
| 2 | HMF22 (BBR22A) | 8.56 | 72.3 | 6.19 |
| 3 | HMF16 (BBR16) | 8.74 | 83.9 | 7.33 |
| 4 | HMF22 (BBR22G) | 6.99 | 90.7 | 6.34 |
| 5 | HMF22 (BBR22G+A) | 7.81 | 79.1 | 6.18 |
| 6 | HMF22 (A1) | 9.38 | 79.1 | 7.42 |
| 7 | HMF22 (BE22) | 8.59 | 53.8 | 4.62 |

Abbildung 7. 5 und Abbildung 7.6 zeigen den Vergleich zwischen Sättigungsgrad SGM (sv:g) und wirksamen Sättigungsgrad (S_{wirk}). Der Vergleich zeigt, dass die beiden Sättigungsgrade zu einer unterschiedlichen Rangfolge der Sättigung führen. Abbildung 7.7 zeigt den Sättigungsgrad SGM, den wirksamen Sättigungsgrad S_{wirk} und den TSR-Wert [3] für jede Mischgutsorte. Zusätzlich ist der Zusammenhang zwischen SGM bzw. Swirk und dem TSR-Wert dargestellt (Abbildung 7.8). Offenbar ergibt sich je nach Sättigungsgrade fallweise eine unterschiedliche Rangierungen. Beispielsweise ist Swirk für Mischgut Nr. 4 im Vergleich zu Mischgut Nr. 3 deutlich tiefer als SGM. Auch ist Swirk von Mischgut Nr. 5 und Nummer 6 praktisch gleich, während sich die entsprechenden SGM-Werte deutlich unterscheiden. Grundsätzlich wäre zu erwarten, dass mit zunehmendem Wert der Sättigungsgrade die TSR Werte abnehmen. Der beschränkte verfügbare Datensatz schliesst zwar eine solche generelle Tendenz nicht aus, doch existieren auch Fälle, die keinen solchen Zusammenhang erkennen lassen. Hierzu wären eingehender Untersuchungen auf einer breiten Datenbasis erforderlich.

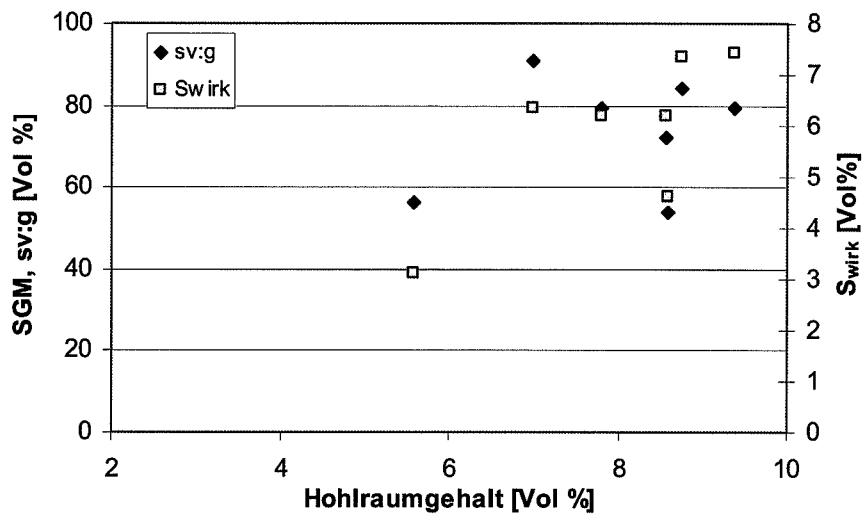


Abbildung 7. 5: Sättigungsgrad SGM für sv:g im Vergleich mit dem wirksamen Sättigungsgrad (Swirk) für verschiedene Hohlräume

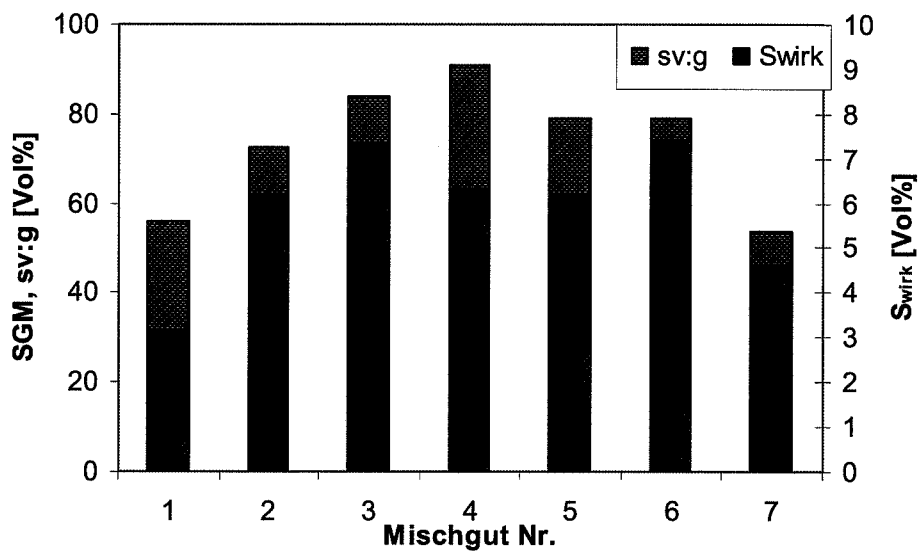


Abbildung 7. 6: Sättigungsgrad SGM, sv:g im Vergleich mit dem wirksamen Sättigungsgrad (Swirk) für verschiedene Mischgutsorten

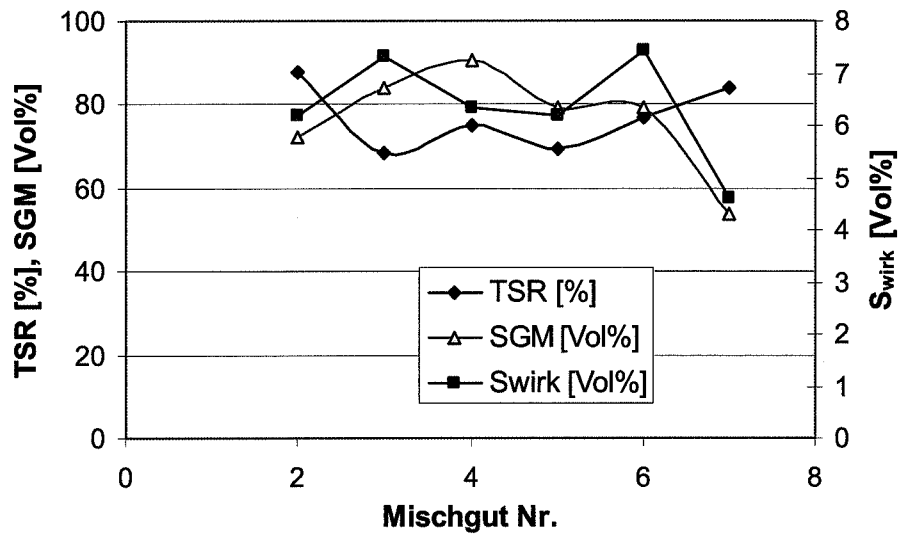


Abbildung 7. 7: Sättigungsgrad SGM, den wirksamen Sättigungsgrad S_{wirk} und den TSR Wert [3] für jede Mischgutsorte

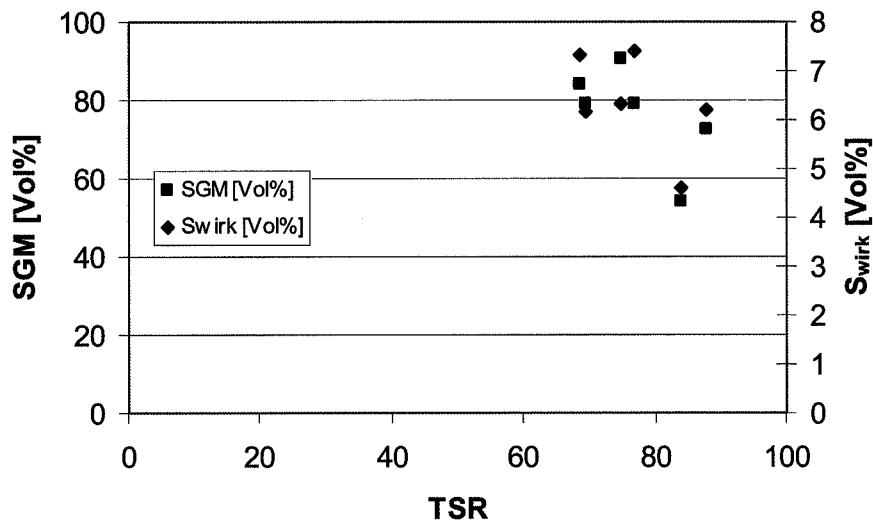


Abbildung 7. 8: der Zusammenhang zwischen SGM bzw. Swirk und dem TSR-Wert

8 FOLGERUNGEN, UMSETZUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

8.1 Allgemeine Folgerungen

Die hier durchgeführte Untersuchung zeigt, dass der Sättigungsgrad nur sehr ungenau ermittelt werden kann, weil einerseits die Wägung des Prüfkörpers nach der Sättigung ein unpräzises Wasservolumen ergibt und andererseits die Rohdichtebestimmung ein bedingt realistisches, gesamtes Hohlraumvolumen liefert. Dies gilt sowohl für "unparaffiniert" als auch für "paraffiniert" [3].

Aus der Literatur ist bekannt, dass, falls die Druckabnahme sowie das Endvakuum nicht kontrolliert und spezifiziert werden, das Wasser mit unerwünscht hoher Geschwindigkeit in die Hohlräume hineinschiesst und dadurch interne Strukturen der Prüfkörper verändern kann.

Es wurde gezeigt, dass die Sättigungsmethode bei der Ermittlung des Sättigungsgrades eine wichtige Rolle spielt. Es ist sinnvoll und praktischer, einen bestimmten absoluten Druck für alle Prüfkörper vorzuschreiben, bei dem der Sättigungsgrad der meisten Prüfkörper innerhalb der ASTM Normgrenzen (55Vol-%...80Vol-%) liegt. Vorgeschlagen wird 300mbar, da mit diesem Druck aufgrund dieser Studie und [3] für die meisten Mischgutsorten ein Sättigungsgrad innerhalb der Normgrenzen erreicht wird.

Dieser Bericht bestätigt die Empfehlungen in [3] mit der Ausnahme, dass die Wägung nach der Sättigung nicht durch eine Tauchwägung ersetzt werden sollte.

Es wird daher vorgeschlagen, für die Überarbeitung der Norm folgende, nachstehende Methode zu benützen, wobei gleiches Endvakuum und gleiche Lagerdauer der Prüfkörper angestrebt werden sollen.

8.2 Vorschläge für Elemente eine Prüfmethode in Ergänzung zu [3]

1. Alle Prüfkörper, die für die gleichen Prüfungen vorbereitet wurden, sollten mit dem gleichen Druck gesättigt werden.
2. Der durch die Norm definierte, minimale Sättigungsgrad von 55% bis 80% kann mit 300mbar Druck erreicht werden.
3. Die Sättigungsgrade SGM aller Prüfkörper sollen die nach ASTM definierten Sättigungsgrenzen zwischen (55Vol% und 80Vol-%) erfüllen.
4. Die Zeitdauer zwischen Konditionierung und Prüfung muss für alle Prüfkörper gleich sein.

5. In Schadensfällen, insbesondere in denen die Prüfkörper einen Unterschied des Hohlraumgehaltes von mehr als 1% aufweisen, und in Forschungsprojekten, kann der wirksame Sättigungsgrad S_{wirk} in die Beurteilung mit einbezogen werden.

9 ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSRICHTUNGEN

Bindemittelablösungen beruhen auf einer Vielfalt von Auswirkungen der Wasserschädigung bei Asphaltmischgut. In einem umfassenden Prüfprogramm sollten daher die verschiedenen Mechanismen der Einwirkung durch Wasser untersucht werden, wie:

1. Aufwärtsbewegung des Wassers durch Kapillarität
2. Hohe Drücke und in-situ Wassertransport (Pumpeffekte) durch Verkehr
3. Regen

Hauptziel der Laborversuche ist die Simulation und Charakterisierung der Materialien bezüglich in-situ Vorgängen. Deshalb ist es notwendig, insbesondere auch die Mechanismen der Schädigung durch Wasser miteinzubeziehen. Die zitierte Arbeit in Abschnitt 4 zeigt, dass die Spaltzugprüfung alleine für die Bestimmung der Wasserschädigung nicht ausreicht. Zusätzliche Informationen über „Stripping“-Voraussage, Verhinderung und Erneuerung des Belags sind nötig. Dazu wird folgendes vorgeschlagen:

- Einarbeiten von Methoden, welche verkehrsbedingte Beanspruchungen berücksichtigen wie „Hamburg Wheel Tracking Test“ und „Immersion Wheel Tracker“.
- Untersuchung des kumulativen Einflusses, der Wasserschädigung auf das Ermüdungsverhalten. Diesbezügliche CAST (coaxial shear test) Prüfungen wurden beispielsweise an der Empa durchgeführt.
- Erzielen eines bessere Verständnisses der verschiedenen Prüfverfahren mit theoretischen Hilfsmitteln wie Bruchmechanik.
- Überprüfen, ob die Erarbeitung nach EN [4] den Prüfkörper schädigt.

10 DANK

In erster Linie möchten wir uns beim Bundesamt für Strassen ASTRA und dem Schweizerischen Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS bedanken, welche mit ihrer Unterstützung die Durchführung dieser Arbeit erst ermöglicht haben.

Ebenfalls würdigen möchten wir alle beteiligten MitarbeiterInnen der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen, insbesondere Herrn C. Meierhofer, Herrn R. Takacs, Frau M. Köhli, Herrn R. Gubler und Herrn O. Neubauer.

11 LITERATUR- UND NORMENVERZEICHNIS

1. ASTM D 4867/D4867M-96: „American Society for Testing Materials, Standard Test Methods for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures“, Approved July 10 1996
2. AASHTO T 283-85: „Resistance of Compacted Bituminous Mixtures to Moisture-induced Damage „, 1985.
3. Gonzales, S., Partl, M., „Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Heissmischfundations-schichten“. Forschungsauftrag 27/98 auf Antrag der „Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute“ (VSS). Forschungsbericht Nr. 458. EMPA Nr. 201'333, Nov. 2000.
4. EN 12697-12: Europäische Norm „Asphalt-Prüfverfahren für Heissasphalt-Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern“, Dez 2003.
5. prEN 13108-1 (SN 640 431-1NA) : Europäischer Norm-Entwurf „Asphaltmischgut-Asphaltbeton Mischgutanforderungen“. Mai 2002.
6. Gubler, R.G., Baida, L.G., „Influence of Stripping on Mechanical Properties of Asphalt“, EMPA report No. FE 201617, June 2003.
7. Cheng, D., Little, D. N. Lytton, R.L., Holste, J.C., „Use of Surface Free Energy Properties of the Asphalt-Aggregate System to Predict Moisture Damage Potential“. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists AAPT, Vol . 71, 2002.
8. Huang, S. Brandthaver, J. Robertson, R., „The Influence of Aggregate on Moisture Susceptibility in Terms of Asphalt-Aggregate Interactions“. Proceedings of the 6th International RILEM Symposium, PTEBM '03, 2003.
9. Birgisson, B., Roque, R. Page, G., „Evaluation of Water Damage Using Hot Mix Asphalt Fracture Mechanics“. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists AAPT, 2003.
10. Wilhelmi, Schulze: "Grenzflächenvorgänge am System Wasser – bituminöse Bindemittel und ihre Bedeutung für die Baupraxis"; Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 5 (1954) Heft 4 und 6 (1955) Heft 1.
11. Kandahl, P. „Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions“. National Center for Asphalt Technology (NCAT) Report No. 92-1.

12. Choubane, B. Page, G. Musselman, J. "Influence of water saturation level on resistance of compacted hot-mix asphalt samples to moisture-induced damage". Transportation Research record 1723, paper No. 00-1241, 2000.
13. Ishai, I, Nesichi, S., "Laboratory Evaluation of Moisture Damage Paving Mixtures by Long-Term Hot Immersion" Transportation Research Board 67th Annual Meeting Jan 11-14 1988, Paper No. 870041.
14. Fwa, T., Oh, C. "Effect of Moisture Content on measured Properties of Asphalt Mixtures", Transportation research record 1492, 1995.
15. Majidzadeh, B.: "Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures"; Highway Research Board 98, 1968.
16. Mallick, R., Gould, J., Bhattacharjee, S., Regimand, A., James, L., Brown, E. "Development of a Rational Procedure for Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt
17. Mostafa, A., Abd El Halim, A. Hassa, Y., "Laboratory Testing of Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixtures- An Overview". Proceedings of the 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. July 2003, Portugal.
18. Hicks, R.G., "Moisture Damage in Asphalt Concrete". National Cooperative Highway Research program, NCHRP, Synthesis of Highway Practice Report 175. 1991.
19. Kiggundu, B.M., Roberts, F.L., "Stripping in HMA Mixtures: State of the Art and Critical Review of Test Methods". National Centre for Asphalt Technology, NCAT, Report No. 88-2, Auburn University, Alabama. 1988.
20. Gordon, A., Young-Kyu, C., "State of the Art Report on Moisture sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials". Road Materials and Pavement Design, Vol 3 No. 4/2002.
21. Stuart, K.D., Moisture Damage in Asphalt Mixtures- A State of the Art Report. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-90-019, 1990.
22. Paving Mixtures". 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 12-16, 2003, Washington DC.
23. D2726 Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface Dry Specimen.
24. Raab, C: "Neue Prüfverfahren der Normen SN 640 431b und SN 640 452c: Festigkeit nach Wasserlagerung", Unterlagen zum Seminar vom 17. Und 18. August 1998 an der EMPA Dübendorf.

25. Junker, J.P., „Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein“, EMPA Forschungsarbeit Nr. 4/73 auf Antrag der VSS. Mai 1981.
26. EN 12697-5 : Europäische Norm „Asphalt –Prüfverfahren für Heissasphalt-Teil 5 Bestimmung der Rohdichte“, July 2000.
27. EN 12697-6 : Europäische Norm „Asphalt –Prüfverfahren für Heissasphalt-Teil 6 Bestimmung der Raumdichte“, July 2000.
28. prEN 13108-1 : Europäische Norm „Asphaltmischgut-Asphaltbeton, Miscgutanforderungen“, Jan 2004

Schweizer Normen

"Verein Schweizerischer Strassenfachleute" (VSS)

29. SN 640 452c: Heissmischfundationsschichten HMF Anforderungen, Ausführung
30. SN 671 965a: "Bituminöses Mischgut: Dichte", 1981
31. SN 671 967a: "Bituminöses Mischgut: Rohdichte, Berechnen des Hohlraumgehaltes", 1981

