



**Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade**

Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut

Influence du taux d'enrobage des granulats minéraux sur les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux

Influence of the Binder Coverage of Mineral Aggregate on the Mechanical Properties of the Bituminous Mixtures

**Remy Gubler Beratung, Thusis
R. Gubler, Dr. sc. nat.**

**IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen
Ch. Angst, Dr. sc. techn.**

**Empa, Dübendorf
C. Raab, Dr., Dipl.-Ing.**

Forschungsauftrag VSS 1999/128 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Dezember 2012

1396



Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut

Influence du taux d'enrobage des granulats minéraux sur les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux

Influence of the Binder Coverage of Mineral Aggregate on the Mechanical Properties of the Bituminous Mixtures

Remy Gubler Beratung, Thuisis
R. Gubler, Dr. sc. nat.

IMP Bautest AG, Oberbuchsiten
Ch. Angst, Dr. sc. techn.

Empa, Dübendorf
C. Raab, Dr., Dipl.-Ing.

Forschungsauftrag VSS 1999/128 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Remy Gubler, Remy Gubler Beratung, Thusis (fachlich, administrativ bis Ende 2007)
Christiane Raab, Empa, Dübendorf (administrativ ab 2008)

Mitglieder

Christian Angst, IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen

Federführende Fachkommission

Fachkommission FK 5 Strassenbautechnik

Begleitkommission

Präsident

Thomas Arn

Mitglieder

Mitglieder EK 5.09
Christian Angst
Remy Gubler
Michel Pittet
Yvan Ramel
Max Seeberger
Felix Solcà

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Inhaltsverzeichnis	5
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Summary	11
1.	Einleitung	13
1.1	Ausgangslage, Problemstellung	13
1.2	Zweck, Ziel	13
1.3	Auftrag	14
1.4	Abänderung, Erweiterung	14
1.5	Bezeichnungen	14
2.	Materialien	15
2.1	Mineralstoffe	15
2.2	Bindemittel	15
3.	Methodik	16
3.1	Charakterisieren der Baustoffe	16
3.1.1	Mineralstoffe	16
3.1.2	Bindemittel	16
3.2	Herstellung und Untersuchen des Mischgutes	16
3.2.1	Herstellen der Körnungen	16
3.2.2	Optimieren des Mischgutes	17
3.2.3	Herstellen des Mischgutes	17
3.2.4	Kontrollprüfungen an Mischgut	17
3.2.5	Haftvermögen zwischen Bindemittel und Mineralstoffen	17
3.3	Herstellung und Prüfen der Prüfkörper	17
3.3.1	Verdichten des Mischgutes mit dem Gyrtorverdichter	17
3.3.2	Verdichten des Mischgutes mit dem Marshallverdichter	18
3.3.3	Lagerungsverfahren	18
3.3.4	Spaltzugprüfung	19
3.3.5	Einaxiale Druck-Schwellversuche	19
3.3.6	Modulbestimmung mit der Spaltzugprüfung	20
3.3.7	Koaxialer Schubtest	20
3.4	Statistische Auswerteverfahren	24
4.	Ergebnisse	26
4.1	Charakterisieren der Baustoffe	26
4.1.1	Mineralstoffe	26
4.1.2	Bindemittel	28
4.2	Untersuchen des Mischgutes	29
4.2.1	Kontrollprüfungen an Mischgut	29
4.2.2	Bestimmen des Umhüllungsgrades	29
4.3	Prüfen der Prüfkörper	30
4.3.1	Kontrolluntersuchungen	30
4.3.2	Spaltzugprüfung	31
4.3.3	Druck-Schwellprüfung	38
4.3.4	Modulbestimmung mit der Spaltzugprüfung	39
4.3.5	Bestimmung des Komplexen Moduls mit dem Druck-Schwellversuch	40
4.3.6	Koaxialer Schubtest, Entwicklung des Moduls unter Wassereinfluss	43
4.3.7	Wasserempfindlichkeit CAST	45
5.	Folgerungen, Empfehlungen	52
5.1	Vergleich der verschiedenen mechanischen Prüfverfahren, Ergebnisse	52
5.2	Vergleich der verschiedenen mechanischen Prüfverfahren, Verfahrensvergleich	54
5.3	Vergleich der Ergebnisse mechanischer Prüfverfahren mit dem Umhüllungsgrad	55

5.4	Bewertung des Umhüllungsgrades aufgrund mechanischer Prüfverfahren	55
5.5	Empfehlungen	56
	Abkürzungen	57
	Literaturverzeichnis	59
	Projektabschluss	61
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	64

Zusammenfassung

Die Erfahrung zeigt, dass aus der Affinität eines Bindemittels zu Mineralstoffen nicht leicht auf das Verhalten des entsprechenden Asphaltes unter Praxisbedingungen geschlossen werden kann. Eine Validierung der Methode zur Bestimmung der Affinität ist deshalb wesentlich und eine Voraussetzung für das Festlegen von Grenzwerten. Dies verhindert auch, dass zwischen Bauherren und Unternehmungen Abmachungen mit erheblichen Kostenfolgen ohne entsprechenden Qualitätsgewinn getroffen werden, weil der validierte Praxisbezug zwischen Messwerten und Verhalten im Belag fehlt.

Die Validierung der Prüfmethode gemäss Norm [SN 670'460] und das Festlegen rational begründeter Grenzwerte gewinnt dadurch an Bedeutung. Der Bedarf für solche Grenzwerte zeigt sich auch daran, dass Kantone für ihren Bereich eigene Grenzwerte festlegen, für die eine Validierung fehlt. Die Kernfrage lautet somit:

Welche Umhüllung gewährleistet noch einen dauerhaften Belag?

Sie kann durch eine Validierung mittels auf das Problem abgestimmten mechanischen Prüfverfahren oder, sehr viel aufwendiger, mittels Teststrecken beantwortet werden. Die Forschungsstellen wurden deshalb beauftragt, die praktische Bedeutung in der Haftprüfnorm [SN 670'460] ermittelten Werte zu ermitteln sowie entsprechende Vorschläge für eine Anforderungsnorm zu formulieren.

Ursprünglich war vorgesehen, eine fein abgestufte Mischserie mit zunehmendem Gehalt eines Mineralstoffes mit schlechten Umhüllungseigenschaften mit wenigen, selektionierten mechanischen Prüfungen zu untersuchen. Die Voruntersuchungen mit solchen Prüfungen zeigten aber rasch, dass nur schon die Unterschiede zwischen verdichtetem Mischgut aus Mineralstoffen mit hohem Umhüllungsgrad und Mischgut aus Mineralstoffen mit tiefem Umhüllungsgrad relativ gering waren. Damit war das Ziel der Forschung in dem Punkt erreicht, dass die Anforderung von 80% an den Umhüllungsgrad ausreichend ist und ihm keine hohe Bedeutung zukommt.

Anstatt diesen Sachverhalt nun durch ausgedehnte Untersuchungen zu bestätigen, entschieden die Forschungsstellen, das Untersuchungsprogramm abzuändern um zu einer differenzierteren Bewertung zu kommen. Die Ziele wurden deshalb nach Absprache mit der zuständigen Kommission EK 5.09 wie folgt definiert:

- Suche nach einem optimalen Prüfverfahren mit dem die Effekte von Wasser möglichst gut aufgezeigt werden können.
- Evaluation eines praxistauglichen, einfachen Prüfverfahrens.
- Verifizierung der noch nicht ausreichend abgestützten Ergebnisse der Voruntersuchungen.

Dabei wurden folgende Prüfverfahren eingesetzt:

- Spaltzugprüfung nach verschiedenen Lagerungsarten, die auch Frosttauwechsel umfassen, wobei verschiedene Mischgüter eingesetzt wurden. Je nach Lagerungsarten wurden geringe bis deutliche Unterschiede zwischen Mischgütern aus wasserempfindlichen und wasserunempfindlichen Kombinationen von Bindemitteln und Mineralstoffen gefunden. In den Serien mit deutlichen Unterschieden zwischen den Mischgütern konnten auch Abweichungen zwischen den Bewertungen mittels mechanischen Prüfverfahren und dem Umhüllungsgrad festgestellt werden.
- Wasserempfindlichkeit ITSr, es konnte keine relevante Abnahme der Festigkeit als Folge der Wasserlagerung festgestellt werden. Die Prüfung stimmte somit nicht mit den Tendenzen des Umhüllungsgrades überein.
- Druck-Schwellversuch mit zwei unterschiedlichen Lagerungsarten. Es wurde entweder keine eindeutige Veränderung der mechanischen Eigenschaften festgestellt oder die Ergebnisse waren kontrovers.

- Modulbestimmung im Spaltzugversuch. Es wurde entweder kein systematischer Trend festgestellt oder die Wasserlagerung führte zu einer nur mässigen Abnahme der Festigkeit.
- Entwicklung des Moduls im koaxialen Schubtest CAST während der Wasserlagerung (16 Messungen in Zeitabständen von drei Stunden). Die Unterschiede zwischen einem wasserempfindlichen und wasserunempfindlichen Mischgut waren gering. Die Prüfung eignet sich also wenig, um die Wasserempfindlichkeit festzustellen.
- Wasserempfindlichkeit CAST gemäss [GUBLER 05]. Es wurden deutliche Unterschiede zwischen wasserempfindlichen und wasserunempfindlichen Mischgütern festgestellt. Die Prüfung gibt somit Hinweise auf das Verhalten unter Praxisbedingungen. Die Bewertung verläuft nicht parallel zum Umhüllungsgrad, sondern stimmt besser mit den Tendenzen im Spaltzugversuch nach geeigneter Wasserlagerung überein.

Folgende Verfahren schneiden gemäss dieser Untersuchung besonders gut ab:

- Wasserlagerung 72 h bei 60°C gefolgt von Spaltzugversuch. Das Verfahren ist einfach und hat gemäss den Ergebnissen dieser Forschung das Potenzial, den ITSR abzulösen, da dieser eindeutig zu wenig differenziert.
- Für vertiefte wissenschaftliche Untersuchungen empfiehlt sich die Wasserempfindlichkeit mit dem CAST, beschrieben in [GUBLER 05]. Das Verfahren ist aufwendig, führt aber zu vertieften Einsichten in das Verhalten des Materials.

Die verwendeten Verfahren decken unterschiedliche Kombinationen der Einwirkung von Wasser und mechanischer Belastung auf Asphaltprüfkörper ab. Für einem Teil dieser Kombinationen zeigte sich eine Tendenz zur Schädigung des verdichteten Mischgutes im Fall von Mineralstoffen mit einem geringen Umhüllungsgrades, die aber nicht so gravierend ist, dass sie eine Verschärfung des Umhüllungsgrades rechtfertigt. Die in der Schweiz übliche Forderung eines Umhüllungsgrades von 80% kann somit beibehalten werden und sollte auf keinen Fall verschärft werden. Das gilt sowohl für Bindemittel, die mit einer vorgeschriebenen Zusammensetzung von Splitten geprüft werden, als auch für die Prüfung einer für ein Mischgut spezifischen Kombination von Bindemitteln und Mineralstoffen.

Résumé

L'expérience montre que l'affinité d'un liant pour les granulats ne permet pas de tirer aisément des conclusions sur le comportement dans la pratique de l'enrobé bitumineux correspondant. La validation de la méthode de détermination de cette affinité est donc importante et une condition préalable pour la fixation de valeurs limites. Une telle validation prévient aussi la conclusion d'accords entre maîtres d'ouvrages et entrepreneurs, avec des conséquences financières importantes et sans qu'il y ait un gain de qualité, lorsqu'il n'existe pas de relation validée entre les valeurs de mesure et le comportement du revêtement.

La validation de la méthode d'essai de la norme [SN 670'460] et la fixation de valeurs limites rationnellement fondées gagne ainsi en importance. La nécessité de telles valeurs limites ressort aussi du fait que les cantons fixent dans leur domaine leurs propres valeurs limites sans pourtant que celles-ci soient validées. La question fondamentale est donc la suivante:

Quel est l'enrobage qui assure encore un revêtement durable?

La réponse peut être apportée par une validation au moyen d'essais mécaniques appropriés ou, ce qui est notablement plus compliqué et coûteux, au moyen de tronçons d'essai. Les centres de recherche ont donc été chargés de déterminer la signification pratique des valeurs déterminées au moyen de l'essai d'adhésivité de la norme [SN 670'460] et de formuler des propositions pour une norme d'exigences.

A l'origine, il était prévu d'étudier au moyen d'un petit nombre d'essais mécaniques sélectionnés à cet effet une série d'enrobés finement gradués présentant des teneurs croissantes d'un granulat minéral possédant de mauvaises caractéristiques d'enrobage. Les études préliminaires avec ces essais ont toutefois rapidement montré que déjà les différences entre des enrobés compactés réalisés avec un granulat à haut degré d'enrobage et des granulats à bas degré d'enrobage étaient relativement faibles. Ainsi le but de l'étude était atteint sur le point que l'exigence d'un degré d'enrobage de 80% est suffisante et que le degré d'enrobage n'a pas une signification élevée.

Au lieu d'alors confirmer ces faits par des études poussées, les centres de recherche ont décidé de modifier le programme de l'étude afin de parvenir à une évaluation plus différenciée. Après accord avec la commission d'experts EK.5.09 concernée, les objectifs ont ainsi été définis comme suit:

- Recherche d'une méthode d'essai optimale permettant de mettre en évidence aussi bien que possible les effets de l'eau.
- Evaluation d'une méthode d'essai simple adaptée à la pratique.
- Vérification des résultats pas encore suffisamment assurés des études préliminaires.

Pour cela on a eu recours aux essais suivants:

- Essai de traction par fendage sur différents enrobés après différents modes de conditionnement comprenant aussi des cycles de gel dégel. Suivant le mode de conditionnement on a obtenu des différences faibles à nettes entre les enrobés réalisés avec une combinaison de liants et de granulats sensibles ou insensibles à l'eau. Dans les séries où les différences entre les enrobés étaient nettes, on a aussi pu constater des écarts entre les évaluations obtenues avec les essais mécaniques et celles obtenues au moyen du degré d'enrobage.
- Essai de sensibilité à l'eau ITSr. On n'a pas constaté de diminution significative de la résistance suite à l'entreposage dans l'eau. Les résultats obtenus avec cet essai ne concordent pas avec les tendances observées avec le degré d'enrobage.
- Essai de compression cyclique avec deux modes de conditionnement différents. On a soit constaté aucune modification nette des propriétés mécaniques soit les résultats étaient contradictoires.

- Détermination du module au moyen de l'essai de traction par fendage. On n'a constaté soit aucune tendance systématique, soit l'entreposage dans l'eau n'a conduit qu'à une diminution modérée de la résistance.
- Evolution du module dans l'essai de cisaillement coaxial CAST au cours de l'entreposage dans l'eau (16 mesures à des intervalles de trois heures). Les différences entre enrobés sensibles et insensibles à l'eau étaient faibles. Cet essai est donc peu adapté pour la détermination de la sensibilité à l'eau.
- Sensibilité à l'eau CAST selon [GUBLER 05]. On a constaté de nettes différences entre les enrobés sensibles et insensibles à l'eau. Cet essai fournit donc des indications sur le comportement en conditions pratiques. Là aussi l'évaluation n'est pas parallèle aux tendances observées avec l'essai de détermination du degré d'enrobage. Les enrobés obtenus avec un mélange de granulats présentant un bon et un mauvais degré d'enrobage présentent des résultats aussi bon que ceux réalisés avec un granulats ayant un bon degré d'enrobage. Ceci concorde avec les résultats de l'essai de traction par fendage associé à un entreposage dans l'eau approprié.

Selon les résultats de cette étude, les essais suivants sont particulièrement bien qualifiés:

- Essai de traction par fendage après entreposage de 72 heures dans de l'eau à 60°C. Cette méthode d'essai est simple et elle possède le potentiel pour venir remplacer l'essai ITSR qui fournit des résultats nettement trop peu différenciés.
- Pour des études scientifiques poussées, il est préférable de recourir à la détermination de la sensibilité avec l'essai CAST décrit dans [GUBLER 05]. Cette méthode est plus compliquée mais elle fournit des informations plus approfondies sur le comportement du matériau.

Les méthodes utilisées comprennent différentes combinaisons de l'action de l'eau et de sollicitations mécaniques sur des éprouvettes d'enrobés bitumineux. Avec une partie de ces combinaisons, on relève une tendance à l'endommagement de l'enrobé compacté lorsque les granulats présentent un faible taux d'enrobage. Cette tendance n'est toutefois pas marquée à un point tel qu'il faille pour cela durcir les exigences du taux d'enrobage. L'exigence d'un taux d'enrobage de 80 % usuelle en Suisse peut ainsi être conservée et ne doit aucunement être rendue plus sévère.

Ceci est valable aussi bien pour les liants qui sont testés avec des granulats de composition prescrite que pour l'examen d'une combinaison de liant et de granulats spécifiques d'un enrobé.

Summary

Experience shows that it is not possible to derive the in situ performance of an asphalt pavement from the affinity between its binder and its mineral aggregates. Therefore, it is necessary to evaluate a method for the determination of the affinity between binder and aggregates and to define limiting values.

The validation of the test method according to Swiss Standard SN 670'460 and the definition of rational and plausible limiting values therefore gains importance. The need for such requirements becomes visible when different cantons set their own limiting values without validating them.

The crucial question is:

Which percentage of affinity is needed to guarantee a long lasting asphalt pavement?

This question can be answered by a validation using suitable mechanical test methods or -more laborious- with the help of test sections. The research organizations were therefore authorized to evaluate the practical relevance of the values determined according to the Swiss Standard 670'460 and to propose limiting values and requirements.

Originally it was planned to determine the behaviour of a fine graded mixture series with increasing percentage of a mineral aggregate with bad affinity properties using specific mechanical test methods.

First tests using such methods rapidly showed that the differences between compacted mixtures with mineral aggregates with high affinity and mixtures with mineral aggregate with low affinity were negligible. With that finding at least one aim of the research was reached since the requirement of 80% affinity is enough and that the affinity does not seem to have a great importance.

Instead of validating this finding through numerous testing the research organizations decided to alter the testing program in order to come up with a more differentiated evaluation.

The aims of the research project were therefore in agreement with the responsible committee EK 5.09 defined as follows:

- Search for an optimal test method which is capable of showing the effects of water on the affinity most effectively.
- Evaluation of a practicable and simple test procedure.
- Verification of the not sufficiently stated results from the first tests.

For the evaluations the following testing methods were used:

- Indirect tensile test after different curing procedures including frost thaw cycles using different mixtures. Depending on the curing distinct differences between the mixtures of water resistant and non-water resistant combinations of binder and mineral aggregates were found. Series with distinct differences between the mixtures also showed differences in the evaluation using either mechanical test methods or the standard affinity test.
- For the water sensitivity ITSR, it was not possible to determine a relevant decrease in durability as a result of the water storage. For this test no correspondence with the standard affinity test exists.
- Cyclic compression test with two different curing regimes. Either no significant change of the mechanical properties could be found or the results showed controvert tendencies.
- Module determination using Indirect Tensile test. Either no specific trend could be found or the water sensitivity test only led to a small decrease in durability.
- Module determination using the Coaxial Shear Test CAST during water storage (16 measurements in 3 hours intervals). The difference between water sensitive and non-

water sensitive mixtures was negligible. This test is therefore not suitable to determine the water sensitivity.

- Water sensitivity using CAST according to [GUBLER 05]. Distinct differences between water sensitive and non-water sensitive mixtures were found. This test therefore enables drawing conclusions regarding the in situ performance. Again, no correspondence with the standard affinity test exists is shown. Mixtures with mineral aggregates showing a good affinity give similar results than mixtures with mineral aggregates showing a bad affinity. This finding is compatible to the Indirect Tensile Test combined with a water storage.

The following test methods showed very good results:

- Water storage for 72h at a temperature of 60°C followed by an Indirect Tensile Test. This test method is simple and according the results from the research shows the potential to replace the ITSr, which does not differentiate enough.
- For scientific evaluations the water sensitivity test using the CAST as described in [GUBLER 05] can be recommended. This method is cumbersome, but gives inside into the material behaviour.

The applied test methods cover different combinations of water interaction and mechanical loading on asphalt specimens. Some of these combinations show a tendency towards damage of compacted mixtures in case of mineral aggregates with low binder coverage, although this tendency is not severe enough to justify increasing the binder coverage of mineral aggregates.

The common Swiss requirement for the binder coverage of 80% should therefore be retained and not increased. This is true for binders, tested with a specified combination of crushed stone as well as for the testing of a mixture specific combination of binder and mineral aggregates.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage, Problemstellung

Die Ablösung des Bindemittels vom Gestein kann unterschiedliche Schäden hervorrufen. Im Schadenskatalog [SN 640'925] sind die folgenden beschrieben:

- Ausmagerungen/Absanden: Verlust von Belagsmaterial von oben bis zum Zerbröckeln der Oberfläche und Schlaglochbildung.
- Kornausbrüche: Einzelne Ausbrüche bis zur zerbröckelten Oberfläche, Netzrisse und Bildung kleiner Schlaglöcher.
- Schlaglochbildung unter Einwirkung von Wasser, Frost und Tausalz als Folgeschäden von Rissbildung.

Forschungen auf dem Gebiet der Einwirkung von Feuchtigkeit haben eine lange Tradition. So wird in der bereits im Antrag für diese Arbeit genannten Literatur [HICKS 91, ALAM 98] auf Verringerung der mechanischen Festigkeit und Erhöhung der Anfälligkeit auf Spurrinnenbildung verwiesen. Die Ablösungen des Bindemittels vom Gestein ist dabei ein wesentlicher Mitverursacher von Schäden, insbesondere von Kornausbrüchen. Bei fortgeschrittener Ablösung leidet die Kohäsion, und es kommt zu einem Verlust der Tragfähigkeit bis hin zur völligen Zerstörung der Schicht. Die Wiederverwendung von Baustoffen, der Einsatz von hellen Gesteinen und von künstlichen Splitten, bei denen keine Erfahrungen vorliegen, kann das Risiko von Schäden vergrössern.

Zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern existiert eine Europäische Norm [EN 12697-12], die auf dem Vergleich der Spaltzugfestigkeit vor und nach Wasserlagerung beruht. Für die verschiedenen Mischgutsorten AC existieren Anforderungen in der Norm SN 640'431b basierend auf dieser Prüfung. Die Beziehung zur Praxis ist jedoch nur unzureichend bekannt. So fehlt auch die Validierung betreffend Anteile umhüllter und nicht umhüllter Mineralstoffe. Der Zusammenhang zwischen Haftvermögen gemäss [SN 670'460] und der Festigkeit nach Wasserempfindlichkeit [EN 12697-12] ist damit unbekannt. Die mechanische Belastung in der Spaltzugprüfung entspricht nicht der Belastung durch den Verkehr, die Deformationsgeschwindigkeit ist beispielsweise viel zu hoch. Ebenso wenig kann die Prüfung auf Wasserempfindlichkeit gemäss [EN 12697-12] die Wechselwirkung zwischen mechanischer Belastung und Wassereinwirkung erfassen. Somit besteht auch in Hinsicht auf das mechanische Prüfverfahren Validierungsbedarf.

1.2 Zweck, Ziel

Wie oben ausgeführt, erlaubt [SN 670'460] wohl das Bestimmen der Affinität zwischen Bindemittel und Mineralstoffen, jedoch ist die Beziehung zum Verhalten eines Belages unter Praxisbedingungen nicht gegeben. Dasselbe gilt für die Europäische Norm. Eine Validierung der Methode und ein Festlegen von Grenzwerten ist deshalb wesentlich. Dies verhindert auch, dass zwischen Bauherren und Unternehmungen Abmachungen mit erheblichen Kostenfolgen ohne entsprechenden Qualitätsgewinn getroffen werden, weil der validierte Praxisbezug zwischen Messwerten und Verhalten im Belag fehlt.

Die Validierung der Prüfmethode gemäss Norm [SN 670'460] und das Festlegen rational begründeter Grenzwerte gewinnt dadurch an Bedeutung. Der Bedarf für solche Grenzwerte zeigt sich auch daran, dass Kantone für ihren Bereich eigene Grenzwerte festlegen, für die eine Validierung fehlt. Die Kernfrage lautet somit:

Welche Umhüllung gewährleistet noch einen dauerhaften Belag?

Sie kann nur beantwortet werden durch eine Validierung mittels eines auf das Problem abgestimmten mechanischen Prüfverfahrens oder sehr viel aufwendiger mittels Teststrecken.

1.3 Auftrag

Die Forschungsstellen wurden beauftragt, die Relevanz der gemäss Haftprüfnorm [SN 670'460] bestimmten Werte des Umhüllungsgrades für die mechanischen Eigenschaften des verdichteten Mischgutes zu ermitteln. Darauf aufbauend waren entsprechende Vorschläge für eine Anforderungsnorm zu formulieren.

1.4 Abänderung, Erweiterung

Ursprünglich war vorgesehen, eine fein abgestufte Mischserie mit zunehmendem Gehalt eines Mineralstoffes mit schlechten Umhüllungseigenschaften mit wenigen, selektionierten mechanischen Prüfungen zu untersuchen. Die Voruntersuchungen mit solchen Prüfungen zeigten aber rasch, dass bereits die Unterschiede zwischen verdichtetem Mischgut aus Mineralstoffen mit hohem Umhüllungsgrad und Mischgut aus Mineralstoffen mit tiefem Umhüllungsgrad unwesentlich waren. Damit war das Ziel der Forschung in einem wichtigen Punkt bereits erreicht, dem Umhüllungsgrad konnte nach diesem Befund keine hohe Bedeutung zukommen.

Anstatt diesen Sachverhalt nun durch ausgedehnte Untersuchungen zu bestätigen, entschieden die Forschungsstellen, das Untersuchungsprogramm abzuändern, wobei die Ziele nach Absprache mit der zuständigen Kommission EK 5.09 wie folgt definiert wurden:

- Suche nach einem optimalen Prüfverfahren, mit dem die Effekte von Wasser möglichst gut aufgezeigt werden können.
- Evaluation eines praxistauglichen, einfachen Prüfverfahrens.
- Verifizierung der noch nicht ausreichend abgestützten Ergebnisse der Voruntersuchungen.

1.5 Bezeichnungen

Normierte Prüfverfahren: Es wird die Bezeichnung gemäss aktueller Norm verwendet, auch wenn die Prüfung nach einer älteren, nicht mehr gültigen Norm durchgeführt worden ist. Im Literaturverzeichnis werden aber die Normen angegeben, nach denen die Prüfungen für diese Forschungsarbeit durchgeführt wurden.

2. Materialien

2.1 Mineralstoffe

Splittkomponente

Für die Splittkomponente wurden ein Mineralstoff mit einem niedrigen (mit A bezeichnet) und einem hohen Umhüllungsgrad (in Praxis verwendet, mit B bezeichnet) ausgewählt. Daneben wurden zwei in der Praxis verwendete Mineralstoffe eingesetzt (C und D), bei denen zumindest in Einzelfällen Adhäsionsprobleme bekannt waren. In Vorversuchen wurden zum Teil vorhandene Mischgüter (E, F gemäss Tabelle 1) eingesetzt. In einzelnen Vorversuchen, bei denen es ausschliesslich um die Optimierung der Prüf- und Lagerungsverfahren und nicht um die Bewertung der Wasserempfindlichkeit ging, wurden Komponenten verwendet, die hier nicht aufgeführt sind. Die Art der Mineralstoffe und ihr Praxisverhalten in Bezug auf Haftung mit dem Bindemittel sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der im Forschungsauftrag verwendeten Splittkomponenten

Bezeichnung	petrografische Angaben	Haftvermögen
A	Quarzit	mangelhaft
B	Kieselkalk	gut
C	aus alluvialem Kies gewonnener, sehr heterogener Splitt	vereinzelt mangelhaft
D	Stauschotter des Emmentals / kristallin, Nagelfluhgerölle	mangelhaft
E	Gneis	teilweise mangelhaft
F	aus alluvialem Kies, Niederterrassenschotter (Hauptbestandteil: Quarz, Granit, daneben Kalk, Sandstein)	teilweise mangelhaft
M	Mischung der Mineralstoffe A (Quarzit) und B (Kieselkalk) im Verhältnis 50 Masse% zu 50 Masse%	Kunstsplitt für diese Forschung
N	Splittmischung gemäss [SN 670'460]	Referenzsplitt für die Norm

Sandkomponente

Es wurde jeweils Sand der gleichen Herkunft wie der Splitt eingesetzt.

Füllerkomponente

Der Einfluss des Füllers auf die Prüfergebnisse sollte minimal sein. Für die Mischungen wurden vorzugsweise der Füller B (gemäss Tabelle 1) oder der Füller gleicher Provenienz wie die anderen Mineralstoffe verwendet. Der breite Einsatz des Füllers B erlaubte es, für die Mischungen den identischen Bindemittelbedarf anzunehmen.

2.2 Bindemittel

Das Standardbindemittel war ein Bitumen 70/100, abweichende Bindemittel lagen in Mischgütern vor, die zur Verfahrensoptimierung eingesetzt wurden. Vereinzelt wurden dabei auch Haftmittel (mit Splitt F) eingesetzt.

3. Methodik

Dieser Teil beschreibt die durchgeführten Untersuchungen. Da die angewendeten Prüfungen in sehr unterschiedlichem Mass als bekannt vorausgesetzt werden können und auch ihr Einsatz zum Teil sehr spezifisch auf diese Untersuchung ausgerichtet erfolgte, werden sie in unterschiedlichem Detaillierungsgrad dargestellt. Im Extremfall wird auf die entsprechende Norm verwiesen. Es wird darum eine dreiteilige Beschreibung gewählt, wobei die einzelnen Teile je nach Bedarf eingefügt werden:

- **Motivation:** Wo sinnvoll wird erläutert, warum diese Prüfung angewendet wurde und was von ihr erwartet wird.
- **Beschreibung:** Diese Beschreibung im engeren Sinne ist in einfachen Fällen der Verweis auf die Norm, ggf. ergänzt durch Hinweise zu Abwandlungen des Verfahrens. In wenig bekannten Prüfungen wird eine vollständige Prüfbeschreibung angegeben.
- **Bewertung:** Einige Verfahren wurden nur in Vorversuchen angewendet, weil es sich schon da zeigte, dass die gesteckten Ziele nicht erreicht werden können.

Ist mehr als nur die Beschreibung im engeren Sinne aufgeführt, werden die einzelnen Teile des Textes durch die obigen Schlagwörter eingeleitet.

3.1 Charakterisieren der Baustoffe

3.1.1 Mineralstoffe

Die Rohdichte der Mineralstoffe wurde gemäss [SN 671 965a] (Pyknometerverfahren mit Toluol) bestimmt. Die Korngrößenverteilung wurde gemäss [EN 933-1] bestimmt.

3.1.2 Bindemittel

Die durchgeführten Prüfungen an Bindemitteln und die dabei verwendeten Verfahren sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Prüfverfahren zur Bindemittelcharakterisierung

Prüfung	Prüfverfahren
Penetration, 25°C	[EN 1426]
Erweichungspunkt R&K	[EN 1427]
Brechpunkt nach Fraass	[EN 12539]
Lösliches in Toluol	[EN 12592]
Dichte, 25°C	[SN 671 965b]
Duktilität	[SN 670 546]
Dynamisch Viskosität bei 60°C	[EN 13702-2]
Dynamisch Viskosität bei 130°C	

3.2 Herstellung und Untersuchen des Mischgutes

3.2.1 Herstellen der Körnungen

Die angelieferten Mineralstoffe A und B wurden soweit nötig abgesiebt, um Körnungen in den gewünschten engen Grenzen zu erhalten (siehe Tabellen 8 bis 11 und Abbildungen 6 und 7).

3.2.2 Optimieren des Mischgutes

Die Mischgutoptimierung erfolgte im Hinblick auf die Herstellung von Gyratorprüfkörpern mit dem gewünschten Zielhohlraumgehalt und hinreichenden mechanischen Eigenschaften. Das setzte eine ausreichende Verdichtungswilligkeit voraus. Testmischungen aus dem Material B wurden mit 204 Gyrationen verdichtet und die Verdichtungskurven visuell beurteilt. Die Korngrößenverteilung wurde bestimmt [EN 933] und als Sollkurve verwendet. Für konkrete Mischungen mit diesen Sollwerten der Korngrößenverteilung wurden die Anteile der Splitt- und Sandkörnungen der Mineralstoffe A, B, C und M (je 50 Masse% A und B) und des Füllers B mit dem Optimierungstool Solver in Excel ermittelt.

3.2.3 Herstellen des Mischgutes

Das Mischgut wurde in Chargen von etwa 18 bis 25 kg vor der Verwendung unter Berücksichtigung der [SN 671'969] hergestellt. Die Mineralstoffe und die Bindemittel wurden mindestens 3 Stunden bzw. 2 Stunden bei einer um 5 °C über der Mischtemperatur liegenden Temperatur gelagert. Die Mischtemperaturen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Mischtemperaturen für die Herstellung von Mischgut

Bindemittel	Mischtemperatur [°C]
50/70	165
70/100	155
PmB Colflex N 55	165

3.2.4 Kontrollprüfungen an Mischgut

Die durchgeführten Kontrollprüfungen und die dabei verwendeten Verfahren sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Prüfverfahren der Kontrollprüfungen an Mischgut

Prüfung	Prüfverfahren
Korngrößenverteilung	Die Korngrößenverteilung wurde gemäss [EN 12697-2], nach Extraktion bestimmt.
Bindemittelgehalt	Der Bindemittelgehalt wurde gemäss [EN 12697-1] bestimmt.
Rohdichte	Die Rohdichte wurde gemäss [EN 12697-5] bestimmt
Verdichtungsverhalten	Das Verdichtungsverhalten (im Sinne einer Machbarkeitskontrolle) wurde anhand der Gyratorverdichtung [EN 12697-31] beurteilt.

3.2.5 Haftvermögen zwischen Bindemittel und Mineralstoffen

Das Haftvermögen zwischen Bindemittel und Mineralstoffen wurde gemäss [SN 670'460] als Umhüllungsgrad bestimmt.

3.3 Herstellung und Prüfen der Prüfkörper

3.3.1 Verdichten des Mischgutes mit dem Gyratorverdichter

Motivation: Für diese Forschung wurde es als wichtig erachtet, das Mischgut auf eine genau gewünschte Verdichtung (entsprechend eines Zielhohlraumgehaltes) herzustellen. Dafür bot sich die Gyratorverdichtung an.

Beschreibung: Für diese Forschung wurde die Gyratorverdichtung nach [EN 12697-31] eingesetzt. Die Verdichtung erfolgte:

- zur Abklärung der Verdichtungswilligkeit mit 204 Gyrationen
- zur Herstellung der Prüfkörper für Untersuchungen auf eine vorgegebene Höhe entsprechend des gewünschten Hohlraumgehaltes.

3.3.2 Verdichten des Mischgutes mit dem Marshallverdichter

Motivation: Herstellung von Prüfkörpern für Prüfverfahren, die die Verwendung von Marshallprüfkörpern vorsehen. Darüber hinaus wurde diese Verdichtung teilweise für Vorabklärungen methodischer Art eingesetzt.

Beschreibung: Für diese Forschung wurde die Marshallverdichtung [EN 12697-30] eingesetzt.

3.3.3 Lagerungsverfahren

Luftlagerung LL

Beschreibung: Die Luftlagerung ohne und nach Wasserlagerung der Prüfkörper erfolgte bei 25 °C dauerte 24 Stunden oder 1 Stunde.

Motivation: Die Luftlagerung wurde für verschiedene Zwecke eingesetzt:

- bei 25 °C während 24 h vor Prüfungen bei Raumtemperatur.
- 1 Stunde nach Lagerungen bei höheren Temperaturen, um im Prüfkörper die gleichen thermischen Bedingungen zu erreichen wie bei den unbehandelten Prüfkörpern.
- während Vergleichsprüfungen bei der gleichen Temperierung (Diese kann konstant oder variierend sein.) wie bei der Prüfung unter Wasser.

Statische Wasserlagerung WL

Motivation: Wasserlagerungen dienen der Abklärung, inwiefern die statische Einwirkung von Wasser bei erhöhter Temperatur das durch Bindemittel verklebte Korngerüst schwächen kann.

Beschreibungen:

Wasserlagerung WL1: Der Prüfkörper wird vorab 24 h bei 60 °C im Wasser gelagert (gemäss [SN 640 452c]).

Wasserlagerung WL2: In dieser Variante wird der Prüfkörper anschliessend noch 1 Stunde bei 25 °C in total entsalztem Wasser gelagert. Damit wird ihm allfällige überschüssige Wärme entzogen.

Wasserlagerung WL3: Der Prüfkörper wird vorab 72 h bei 60 °C im Wasser gelagert (gemäss [SN 640 452c]).

Frost-Tau-Wechsel FT

Motivation: Frost-Tau-Wechsel dienen der Abklärung, inwiefern die Temperaturschocks und die dadurch erzwungenen Dehnungen das durch Bindemittel verklebte Korngerüst schwächen können. Der Belastung durch Frost-Tau-Wechsel kann eine statische Wasserlagerung vorangehen, sodass komplexe Klimaeinwirkungen simuliert werden können.

Frost-Tau-Wechsel (FTN₅₀, gemäss Prüfvorschrift des Büros für Nationalstrassen, Kanton Solothurn „Frost-Tau-Salz-Beständigkeit von Festbeton“; Mai 1995) FT1: Der Prüfkörper wird abwechslungsweise in zwei Bädern (1 und 2) für eine definiert Zeit gelagert. Der Wechsel zwischen den Bädern erfolgt automatisch innert einer Minute. Die

Verweilzeit des Prüfkörpers beträgt 21 Minuten im Bad von 20°C und 44 Minuten im Bad von -20°C. Das Bad 1 enthält Salzwasser und wird bei +20°C temperiert, das Bad 2 Glycerin und wird bei -20°C temperiert. Diese Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wird in der Betontechnologie zur Beurteilung der Frost-Tau-Salz-Beständigkeit verwendet. Der Prüfkörper wird dabei so vielen Belastungszyklen unterzogen, bis der E-Modul auf einen Restwert von 50% gefallen ist; daher die Bezeichnung N_{50} . Im vorliegenden Fall wurde die Anzahl der Belastungszyklen auf 40 und/oder 80 festgelegt.

Frost-Tau-Wechsel (FTN₅₀) Verschärfte Variante FT2: Der Prüfkörper wird vorab 24 h bei 60 °C im Wasser gelagert (gemäss [SN 640 452c]), anschliessend vor der Frost-Tau-Salz-Beanspruchung (in Anlehnung an [SN 670 845a]) unter Vakuum gesättigt. Die Bedingungen der Frost-Tau-Salz-Beanspruchungen wurden zudem bezüglich Temperatur verschärft (+ 31°C und -21°C).

Frost-Tau-Wechsel (FTN₅₀) FT3: Der Prüfkörper wird vor der Frost-Tau-Salz-Beanspruchung (in Anlehnung an [SN 670 845a]) unter Vakuum gesättigt und in Plastiksäcke verpackt. Die Badtemperaturen sind +20°C und -21 °C. Es werden 120 Zyklen durchgeführt.

Frost-Tau-Wechsel (N₅₀) gemäss SIA 162/1, Prüfung Nr. 8 „Frostwechselverhalten“ 1989 FT4: Die Prüfkörper werden 1 Woche unter Wasser gelagert, damit sie wassergesättigt sind. Pro Zyklus werden sie zwei Stunden unter Wasser bei +20°C gelagert, dann an der Luft während einer Stunde auf -25 °C abgekühlt, anschliessend 4,5 Stunden bei dieser Temperatur belassen und zuletzt während einer halben Stunde wieder unter Wasser aufgetaut. Insgesamt wurden 120 Zyklen gefahren.

3.3.4 Spaltzugprüfung

Motivation: Mit einer einfachen und rasch durchzuführenden Prüfung die mechanische Eigenschaften zu ermitteln, wobei das Verfahren insbesondere auf die Schwächung der Kohäsion durch Wassereinfluss ansprechen sollte. Die Spaltzugprüfung wurde als geeignet beurteilt, weil eine geschwächte Kohäsion sich bei einer Zugbelastung stärker auswirkt als bei anderen Belastungsarten.

Beschreibung: Die Spaltzugprüfung wurde nach [EN 12697-23] durchgeführt. Die vorgängig angewandten Lagerungsverfahren für die Konditionierung der Prüfkörper sind in den Tabellen mit den Ergebnissen aufgeführt.

Prüfparameter Spaltzugversuch (SPV): gemäss Norm EN 12390-6:2001: Die Prüfung wurde an bei 25 °C temperierten Prüfkörpern mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 52 mm/min bei Raumtemperatur durchgeführt.

3.3.5 Einaxiale Druck-Schwellversuche

Druck-Schwellversuche an konditionierten Prüfkörpern

Motivation: Mit einer versuchstechnisch einfachen, zyklischen Dauerbelastung den Widerstand des Prüfkörpers gegen bleibende Verformung zu ermitteln. Der einaxiale Druck-Schwellversuch simuliert vereinfacht die Belastung der Strasse durch das sie überrollende Rad.

Beschreibung: Die Druck-Schwellversuche wurden gemäss [EN 12697-26] durchgeführt. Die dabei angewandten Lagerungsverfahren für die Konditionierung der Prüfkörper sind in den Tabellen mit den Ergebnissen aufgeführt.

Druck-Schwellversuch (DSV): gemäss TPB A-St-B „Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme“; Ausgabe 1999: Die Prüfung wird bei 50 °C durchgeführt. Der Grundlast von 0.025 N/mm² wird eine Oberlast von 0.35 N/mm² als Haversine überlagert. Erfasst wird die Steigung im Wendepunkt [(‰)/10000 Lastwechsel]. Die Verformung wird jeweils bei

der maximalen Last gemessen.

Ergebnis: Mittelwert der Steigung im Wendepunkt einer 3^{er} Serie [(‰)/10000 Lastwechsel]

Vergleichende Druck-Schwellversuche in Luft und Wasser

Motivation: Den Einfluss der Kombination Wasser und Belastung in Anlehnung an einen verbreiteten und normierten Versuch erfassen zu können.

Beschreibung: Die Druck-Schwellprüfung wurde wie oben beschrieben durchgeführt, wobei als Abwandlung der Prüfkörper in einen zylinderförmigen Behälter aus Metall gelegt und das Ganze dann auf den Sockel der Prüfmaschine gestellt wurde, sodass der Prüfkörper genau zentriert zwischen Sockel und dem Stempel stand (siehe Abbildung 1). Der Behälter war so gestaltet, dass er soweit mit Wasser gefüllt werden konnte, bis der eingespannte Prüfkörper überdeckt wurde. Der Blechbehälter wurde bei Prüfungen in Wasser und in Luft eingesetzt.

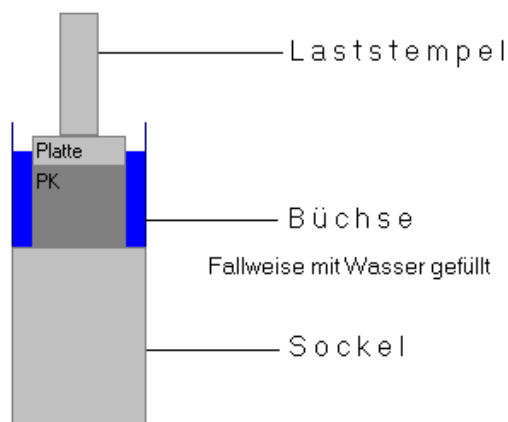


Abbildung 1: Prüfaufbau für vergleichende Druck-Schwellversuche in Luft und Wasser

Bewertung: Der Versuch wurde mit zwei verschiedenen Gefässen (einer dünnwandigen Blechbüchse und einer stabileren Konstruktion) durchgeführt. Die Anordnung musste aus praktischen Gründen so gewählt werden, dass die Verformung des Gefässes mitgemessen wurde. Die Analyse der Daten zeigte, dass die dünnwandige Blechbüchse schon durch die Grundlast weitgehend verformt wurde, während das beim dickwandigen Gefäss nicht der Fall war. Letzteres bewegte sich auch sichtbar unter den Pulsen und lieferte somit unbrauchbare Ergebnisse.

Es zeigte sich, dass der Einfluss des Wassers zu gering war und er wegen der experimentellen Schwierigkeiten nicht erfasst werden konnte. Die Untersuchungsserie wurde daher eingestellt.

3.3.6 Modulbestimmung mit der Spaltzugprüfung

Motivation: Bestimmen des komplexen Moduls mit einer versuchstechnisch einfachen Prüfung.

Beschreibung: Die Modulbestimmung wurde gemäss [EN 12697-26] durchgeführt.

3.3.7 Koaxialer Schubtest

Prüfkonzept

Der Koaxiale Schubtest wurde von J. Junker entwickelt [JUN87] und von K. Sokolov und R. Gubler [SOKOLOV 05] weiterentwickelt. Der Test basiert auf der Idee, einen Bohrkern annähernd unter praxismgerechter Belastung dynamisch zu prüfen. Darunter wird verstan-

den, dass die Belastung senkrecht zur Schicht zu erfolgen hat, während die seitliche Unterstützung durch das Anleimen an einen äusseren Stahlring, simuliert wird. Aus diesem Konzept ergibt sich der Aufbau wie er in Abbildung 2 für den Fall der Prüfung unter Wasser gezeigt ist.

Die Belastung senkrecht von oben, wobei entweder gemäss des Signals des Lastaufnehmers kraft geregelt oder gemäss des Signals des Wegaufnehmers weggeregelt geprüft wird. Die Temperaturen werden direkt am Prüfkörper, gegen die Umgebung mit Kitt thermisch isoliert, gemessen. Zudem wird gewartet bis an der Messstelle die Temperatur verlässlich erreicht wird (zulässige Abweichung während zwei Minuten in jeder von 32 Messungen weniger als 0.2 °C). Für die erste Temperatureinstellung wird nach Erreichen dieser Temperatur 2 Stunden, nach jedem Temperatursprung (nicht mehr als 5 °C) 4000 Sekunden gewartet. Damit ist der Prüfkörper bei Beginn der Belastung im thermischen Gleichgewicht. Zudem ist die Prüfsoftware so ausgelegt, dass eine übermässige Belastung vermieden wird (durch automatische Reduktion der Sollamplituden) und keine die Prüfung überlagernden Kriechvorgänge die Resultate verfälschen (durch übergeordnetes Regeln der Lage bei Kraftregelung) kann.

Die Messungen werden bei Modulbestimmungen paketweise durchgeführt und die Schwingbelastung zeitlich minimiert, damit durch den damit verbundenen Energieeintrag eine nur minimale Erwärmung stattfindet. Das verhindert einen systematischen Fehler, der eine grössere Erwärmung zur Folge hätte. Bei Ermüdungsprüfungen kann diese Erwärmung nicht verhindert werden, hier wird bei der Auswertung die Anpassung an das thermische Gleichgewicht berücksichtigt.

Die Messwerte werden binär und für dynamische Signale in vollem Umfange gespeichert. Mit speziellen Auswerteprogrammen können umfangreiche Auswertungen nach verschiedenen Gesichtspunkten vorgenommen werden.

Modulbestimmung, Langzeitprüfung

Motivation: Verfolgen des komplexen Moduls während der statischen Langzeiteinwirkung von Wasser auf den Prüfkörper.

Beschrieb: Die Modulbestimmungen wurden nach den obigen Prüfprinzipien durchgeführt. Die Lagerungs- und Prüfbedingungen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Versuchsparmeter der Modulbestimmung, Langzeitprüfung

Versuchsparameter	Einstellung
Temperaturen	16 Abschnitte, jeweils 40 °C
Frequenzen	2, 5 und 10 s ⁻¹ bei jedem Abschnitt
Amplituden, weggeregelt	0.005, 0.01, 0.015 mm für jede eingestellt Frequenz
Wartezeit vor der ersten Temperatur	4000 s
Wartezeit vor den anderen Abschnitten	10800 s

Wasserempfindlichkeit mit dem koaxialen Schubtest

Motivation: Die Wasserempfindlichkeit ermöglicht es, die Reaktion eines Asphaltes auf kombinierte Belastung von dynamischer Belastung, Wasser und Temperatur zu untersuchen. Da es sich um eine sehr aufwendige Prüfung handelt, wurden nur ausgewählte Mischgute untersucht.

Beschrieb: Die genaue Durchführung der Wasserempfindlichkeit ist in [GUBLER 05] beschrieben. Die Prüfung wird im Bereich hoher (sommerlicher) Temperaturen durchgeführt, d.h. im oberen Temperaturbereich, der im noch regennassen Asphalt erreicht werden kann. Sie bildet damit einen praxisrelevanten Belastungsbereich ab. Wie bei der Ermüdungsprüfung wird der Asphalt dauernd weggeregelt einer Schwingbelastung unterworfen. Zugleich werden Temperaturrampen gefahren, wobei die an- und absteigenden

Rampen die gleiche Geschwindigkeit haben. Die Temperaturänderung wird dabei so klein gehalten, dass die Erwärmung/Abkühlung auch das Innere des Prüfkörpers erreicht. Die Prüfung wird dabei einmal in Luft und ein zweites Mal unter Wasser durchgeführt. Je nach Wasserempfindlichkeit des Mischgutes zeigen Untersuchungen deutliche Unterschiede zwischen den Prüfungen an der Luft und unter Wasser. Die Unterschiede betreffen dabei nicht nur die Steifigkeit sondern auch deren Abnahme und das viskoelastische Verhalten, erfasst durch den Phasenwinkel. Eine auf das Problem zugeschnittene Auswertesoftware erlaubt es, die Effekte quantitativ zu erfassen.

Die Abbildung 2 zeigt den Versuchsaufbau, die Abbildung 3 das Prinzip der Temperaturrampen und die Tabelle 6 die Prüfbedingungen im Detail.

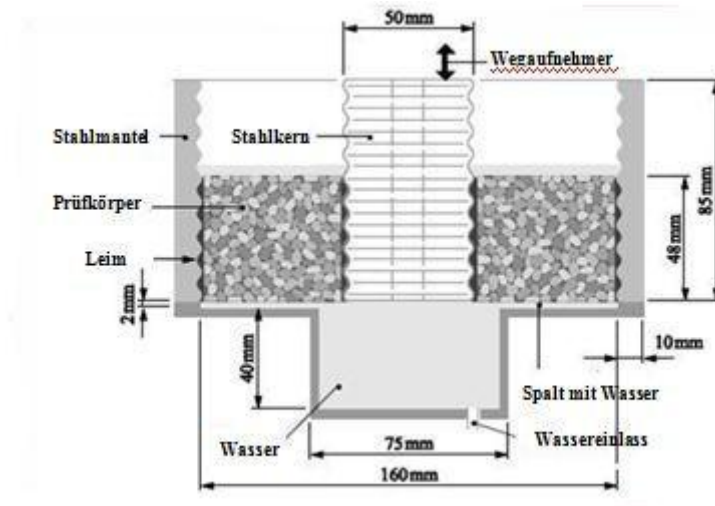


Abbildung 2: Prüfaufbau, Bestimmung unter Wasser

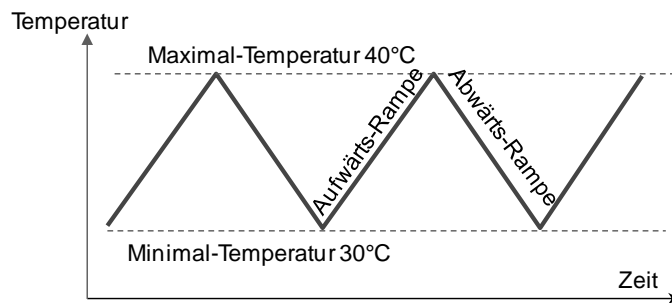


Abbildung 3: Prinzip der Temperaturrampen

Tabelle 6: Versuchsparmeter der Bestimmung der Wasserempfindlichkeit CAST

Prüfbedingungen und Prüfprogramm	
Temperierung vor Beginn	3600 s / 30 °C
Frequenz	10 Hz
Deformationsamplitude, Regelgröße	0.02 mm
Temperaturzyklus	Rampe von 30°C bis 40°C in 18000 s, gefolgt von einer Rampe abwärts bis 30°C in der gleichen Zeit
Anzahl Temperaturzyklen	5
typische Dimension eines Prüfkörpers	
Höhe des Prüfkörpers	48 mm
äusserer Radius	75 mm
innerer Radius	27.5 mm
Durchmesser	150 mm

Auswerteverfahren

Die Abbildungen 4 und 5 weisen auf die Möglichkeit hin, die Wasserempfindlichkeit als Verschiebung der Rampen Modul vs. Phasenverschiebung zu erfassen. Der Übersichtlichkeit wegen sind in diesen Abbildungen nur die Rampen 1, 3 und 5 markiert, die Rampen 2 und 4 liegen jeweils dazwischen. Die Abbildung 4, links, zeigt, dass die erste Rampe bei steigender Temperatur aus dem Rahmen fällt und nicht ausgewertet werden kann. Das rührt von der Überlagerung der bei Dauerbelastungen üblicherweise feststellbaren ausgeprägten Modulabnahme zu Beginn mit der zu untersuchenden Wasserempfindlichkeit her. Daher wurde entschieden, nur die Rampen fallender Temperatur (Abbildung 5, rechts) zu berücksichtigen. Untersucht wurde zudem, ob die Bestimmung der Abnahme sich auf Messpunkte des mittleren oder einem der extremen Bereiche (bei Endpunkten links und rechts) stützen.

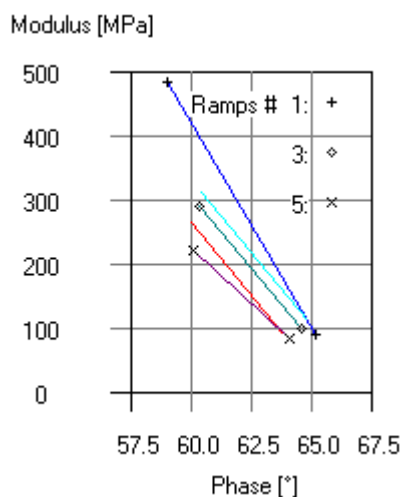


Abbildung 4: Modul vs. Phasenverschiebung, bei Rampen steigender Temperatur, geprüft unter Wasser

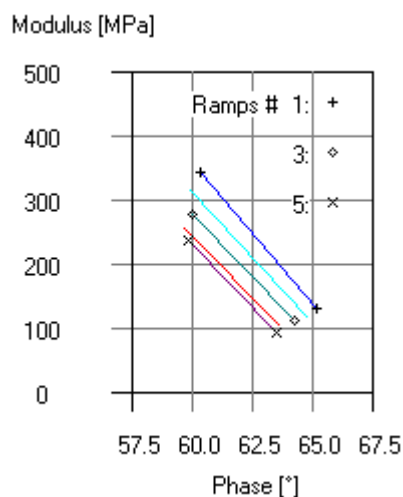


Abbildung 5: Modul vs. Phasenverschiebung, bei Rampen fallender Temperatur, geprüft unter Wasser

Aus statistischen und versuchstechnischen Gründen wurde der mittlere Bereich gewählt. Zum einen umfasst er weit mehr Einzelwerte als die anderen, ist also statistisch besser abgestützt. Zum andern muss das Programm an den Extrempunkten den Temperaturgang umkehren. Es heizt also kräftig beim unteren Wendepunkt und kühlt ebenso kräftig beim oberen. Die Überlegungen zur thermischen Trägheit des Prüfkörpers lassen es als wahrscheinlich erscheinen, dass bei den Umkehrpunkten ein weiter vom Gleichgewicht entfernter Zustand herrscht als in der Mitte der Rampe, d.h. mehr Störeinflüsse auf das Ergebnis zu erwarten sind. Der kleine Modul bei der oberen Temperatur ist zudem mit

höheren Messfehlern behaftet als der grössere im mittleren oder unteren Bereich der Rampe.

Durch die Punkte des mittleren Bereichs jeder Rampe wird eine Regressionsgerade der Modulwerte gelegt. Zudem wird der Mittelwert aller verwendeten x-Werte (Phasen in der Abbildung oben, aller fünf Rampen) berechnet. Als der charakteristische Modul M_i der Rampe i gilt dann der Wert der Regressionsgerade bei diesem gemittelten x-Wert.

Die Abbildung 5 mit den Ergebnissen der Rampen fallender Temperatur zeigt zudem, dass die Abnahme anfangs grösser ist und dann abnimmt. Eine feste prozentuale Abnahme beschreibt das Verhalten durchwegs besser als eine im Modul konstante Abnahme. Für die Abnahme A_i von Rampe i zu Rampe $i+1$ gilt somit:

$$A_i = 100 \cdot (1 - M_{i+1} / M_i) \quad (1)$$

Bei den verwendeten 5 Rampen sind das vier Werte A_1 bis A_4 , die in der Einheit Modul-% vorliegen. Sie können gemittelt werden, für die Prüfung an der Luft gibt das die durchschnittliche Abnahme D_L , für die unter Wasser die durchschnittliche Abnahme D_W , beide in Modul-%. Daraus wiederum lässt sich der Wasserempfindlichkeitskoeffizient W_C (wiederum in Modul-%) gemäss (2) berechnen.

$$W_C = D_W - D_L \quad (2)$$

3.4 Statistische Auswerteverfahren

Datenmaterial und Grenzen der Aussage

Die Forschung umfasst unterschiedliche Prüfungen mit sehr unterschiedlichem Prüfaufwand. Zudem zeigte sich je nach Prüfverfahren schon früh oder erst später, ob das Verfahren erfolgversprechend war oder nicht. Im zweiten Fall wurde auf weitere Prüfungen verzichtet. Auch wurden von den Forschungsstellen unterschiedliche Materialien eingesetzt. Aus solchen Faktoren resultiert eine sehr heterogene Datenstruktur, die eine verfeinerte statistische Auswertung verunmöglicht.

Die Untersuchungen umfassen einige für schweizerische Verhältnisse typische Mineralstoffe und einen Quarzsplitt, der nach den hier erarbeiteten Ergebnissen als nicht extrem wasserempfindlich einzustufen ist. Die Aussagen dieser Forschung gelten somit nur für schweizerische Verhältnisse typische Mineralstoffe.

Spreizung und Differenzierung

Mit dieser Art von Auswertungen wurde abgestrebt, einen übersichtsmässigen Vergleich zwischen den Prüfungen zu ziehen und eine grobe Charakterisierung ihrer Leistungsfähigkeit zu ermöglichen. Diese stützt sich auf folgende drei Kenngrössen ab:

- Standardabweichung: Mittelwert der Standardabweichung der Bestimmungen an allen untersuchten und auswertbaren Materialien. Auswertbarkeit ist dabei gegeben, wenn mindestens zwei valide Bestimmungen vorliegen.
- Spreizung: Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Materialkennwert (Mittelwert der Bestimmungen an diesem Material).
- Differenzierung: Spreizung dividiert durch die Standardabweichung, die letztere berechnet als das Mittel der gefundenen Standardabweichungen der untersuchten Materialien.

Angewendet wurde dieses Verfahren nur in den Fällen, in denen Untersuchungen mit mindestens zwei Bestimmungen an Prüfkörpern aus bekanntermassen unterschiedlich wasserempfindlichen Mischgütern vorlagen. Unter diesen Voraussetzungen ist die oben definierte Spreizung ein sinnvolles Mass, denn sie umfasst zumindest die Bestimmung an einem wenig empfindlichen und an einem wasserempfindlichen Mischgut. Diese rein numerische Differenz besagt aber noch nicht, ob die Prüfung auch zwischen diesen Materialien unterscheidet. Das ergibt sich erst aus dem Vergleich mit der für das Prüfverfahren

typischen Standardabweichung.

Bewertung

Grob gesagt: Nur wenn die Spreizung das Doppelte der oben definierten Standardabweichung übertrifft, kann die Prüfung überhaupt unterscheiden. Der einfache Kennwert ist daher die Differenzierung, die das klar aufzeigt. Es kann somit klassiert werden:

- Differenzierung kleiner 2: Die Prüfung kann nicht zwischen den gut geeigneten und weniger geeigneten Mineralstoffen unterscheiden.
- Differenzierung 2 bis 4: Die Prüfung kann zwischen den gut geeigneten und weniger geeigneten Mineralstoffen unterscheiden, ermöglicht dabei aber nur eine Ja/Nein-Aussage.
- Differenzierung über 4: Die Prüfung kann zwischen unterschiedlich gut geeigneten Mineralstoffen unterscheiden.

Spezielle Berechnungen

Teilweise mussten wegen der begrenzten Menge von Daten für das Bestimmen der Standardabweichung spezielle Verfahren angewendet werden. Diese sind hier beschrieben.

Standardabweichungen der Spaltzugprüfungen

Die Spaltzugprüfung besteht jeweils aus der Bestimmung von je drei Einzelwerten an den der gewünschten Lagerung unterzogenen Proben und drei Einzelbestimmungen an Referenzproben. Daraus wurden Mittelwerte für die gelagerten Proben und für die als Referenz dienenden Proben berechnet aus denen dann die verbleibende Standfestigkeit ermittelt wurde. Details sind aus den Tabellen 19, 20, 22, und 25 bis 29 zu ersehen. Es ist daraus ersichtlich, diese Werte wechselnden Materialien, Lagerungsbedingung oder Prüfbedingungen zuzuordnen sind. Es fehlen somit Untersuchungsreihen zum Bestimmen der Standardabweichungen der verbleibenden. Bestimmt werden können hingegen die Standardabweichung der Einzelwerte (3 pro Prüfung) absolut und relativ (in Prozent des Mittels der Referenz).

Die relativen Standardabweichungen wurden gemittelt, gemäss zentralem Grenzwertsatz der Statistik durch Wurzel aus 3 (1.732) dividiert, um die relative Standardabweichung des Mittelwertes der drei Einzelwerte zu erhalten. Unter der Annahme, dass bei der Bestimmung der Referenzwerte die gleiche Messunsicherheit vorliegt, muss dieser Wert, gemäss den Regeln der Fehlerfortpflanzung noch mit Wurzel 2 multipliziert werden. Das so erhaltene Ergebnis wurde dann für die Bewertung aller Untersuchungen mit der Spaltzugprüfung verwendet.

Wasserempfindlichkeit CAST

Die Bestimmung in Luft und jene unter Wasser wurden, da es sich um eine zerstörende Prüfung handelt, an verschiedenen Prüfkörpern durchgeführt. Sie sind somit, statistisch betrachtet, nicht verbunden. Die Berechnung einer Standardabweichung aus den einzelnen Koeffizienten der Wasserempfindlichkeit ist damit nicht zulässig. Es wurden deshalb Standardabweichungen Luft und Standardabweichungen Wasser bestimmt und gemittelt. Da bei der Berechnung des Koeffizienten der Wasserempfindlichkeit Differenzen der Werte Luft und Wasser gebildet werden, gilt die Fehlerfortpflanzung, gemäss der das Quadrat der Fehler des Ergebnisses die Summe der Quadrate der Fehler der Teilergebnisse ist. Die gefundene Standardabweichung muss deshalb mit der Wurzel aus 2.00 multipliziert werden.

Der so erhaltene Wert muss angesichts des geringen Umfangs der Datenbasis als ein Schätzwert betrachtet werden.

4. Ergebnisse

4.1 Charakterisieren der Baustoffe

4.1.1 Mineralstoffe

Der angelieferte Sand 0.2/3 der Mineralstoffe A und B wurde fraktioniert, um Körnungen 0.25/1 und 1/3 zu erhalten. Die Rohdichten ausgewählter und hergestellter Korngruppen der Mineralstoffe A und B sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Rohdichten ausgewählter Korngruppen der Mineralstoffe B und A

	Mineral B	Mineral A
Rohdichte, Fraktion 6/11 kg/m ³	2690	2657
Rohdichte, Fraktion 0.25/1 kg/m ³	2687	2617

Die Korngrößenverteilungen (Siebdurchgänge in Masse-%) der Korngruppen des Mineralstoffes B sind in Tabelle 8 zusammengestellt und in Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 8: Korngrößenverteilung der Korngruppen [Masse-%] des Mineralstoffes B

Siebgröße [mm]	6/11	3/6	1/3	0.25/1	0.09/0.25	Füller
11.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
8.0	63.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
5.6	5.0	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0
4.0	0.0	41.3	100.0	100.0	100.0	100.0
2.8	0.0	5.6	99.5	100.0	100.0	100.0
2.0	0.0	0.0	61.1	99.8	100.0	100.0
1.0	0.0	0.0	8.0	99.6	100.0	100.0
0.500	0.0	0.0	0.5	53.4	97.6	100.0
0.250	0.0	0.0	0.5	5.2	92.1	98.7
0.125	0.0	0.0	0.4	0.4	29.0	89.5
0.090	0.0	0.0	0.4	0.4	6.9	12.7

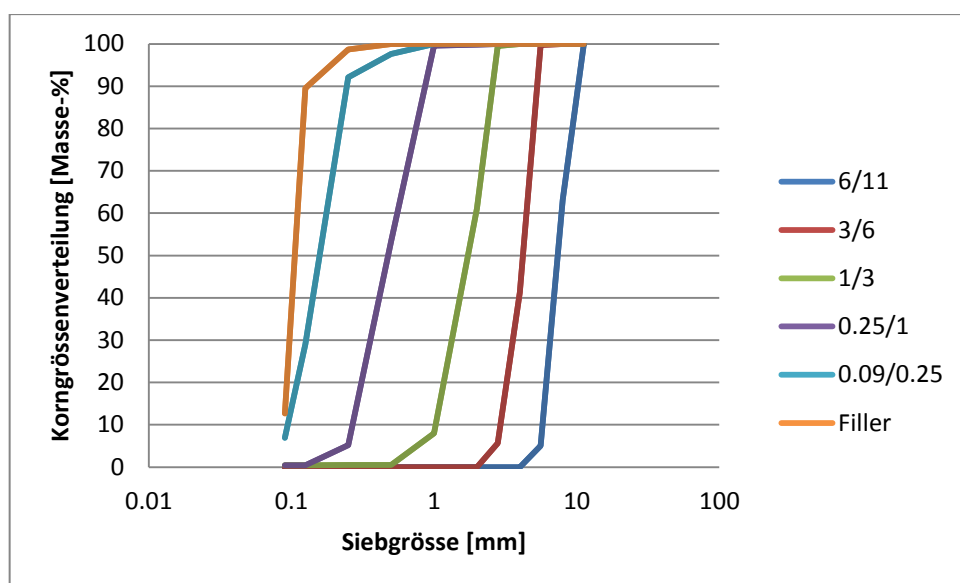


Abbildung 6: Korngrößenverteilung der Korngruppen des Minerals B

Zur Verifizierung der Homogenität der Körnungen wurde eine Wiederholung der Bestimmung der Korngrößenverteilungen durchgeführt. Die Ergebnisse (Siebdurchgänge in Masse-%) der Körnungen des Minerals B sind in Tabelle 9 zusammengestellt (an den Fraktionen 0.09/0.025 und Füller nicht bestimmt).

Tabelle 9: Wiederholte Bestimmung der Korngrößenverteilung [Masse-%] ausgewählter Korngruppen des Mineralstoffes B

Siebgrösse [mm]	6/11	3/6	1/3	0.25/1
11.2	100.0	100.0	100.0	100.0
8.0	61.7	100.0	100.0	100.0
5.6	5.0	99.8	100.0	100.0
4.0	0.1	40.0	100.0	100.0
2.8	0.1	6.4	99.5	100.0
2.0	0.0	0.1	61.1	99.8
1.0	0.0	0.1	6.9	99.5
0.500	0.0	0.1	0.3	50.5
0.250	0.0	0.1	0.3	4.6
0.125	0.0	0.1	0.3	0.4
0.090	0.0	0.1	0.2	0.4

Die absoluten Differenzen zwischen den Wiederholungen der Korngrößenverteilungen (Siebdurchgänge in Masse-%) der Korngruppen des Minerals B sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Die sehr kleinen Unterschiede belegen eine gute Homogenität.

Tabelle 10: Variation der Korngrößenverteilung [Masse-%] ausgewählter Korngruppen des Mineralstoffes B

Siebgrösse [mm]	6/11	3/6	1/3	0.25/1
11.2	0	0	0	0
8.0	1.4	0	0	0
5.6	0	0.1	0	0
4.0	0.1	1.3	0	0
2.8	0.1	0.8	0	0
2.0	0	0.1	0	0
1.0	0	0.1	1.1	0.1
0.500	0	0.1	0.2	2.9
0.250	0	0.1	0.2	0.6
0.125	0	0.1	0.1	0
0.090	0	0.1	0.2	0

Die Korngrößenverteilungen (Siebdurchgänge in Masse-%) der Korngruppen des Mineralstoffes A sind in Tabelle 11 zusammengestellt und in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 11: Korngrößenverteilung [Masse-%] der Korngruppen des Mineralstoffes A

Siebgröße [mm]	6/11	3/6	1/3	0.25/1	0.09/0.25	Füller
11.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
8.0	78.3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
5.6	31.1	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0
4.0	0.1	70.9	100.0	100.0	100.0	100.0
2.8	0.0	18.9	99.8	100.0	100.0	100.0
2.0	0.0	0.2	74.4	99.8	100.0	100.0
1.0	0.0	0.2	13.6	99.3	100.0	100.0
0.500	0.0	0.2	0.5	53.5	91.9	100.0
0.250	0.0	0.2	0.1	9.1	74.5	100.0
0.125	0.0	0.2	0.1	0.5	5.8	63.9
0.090	0.0	0.2	0.1	0.2	0.5	39.4

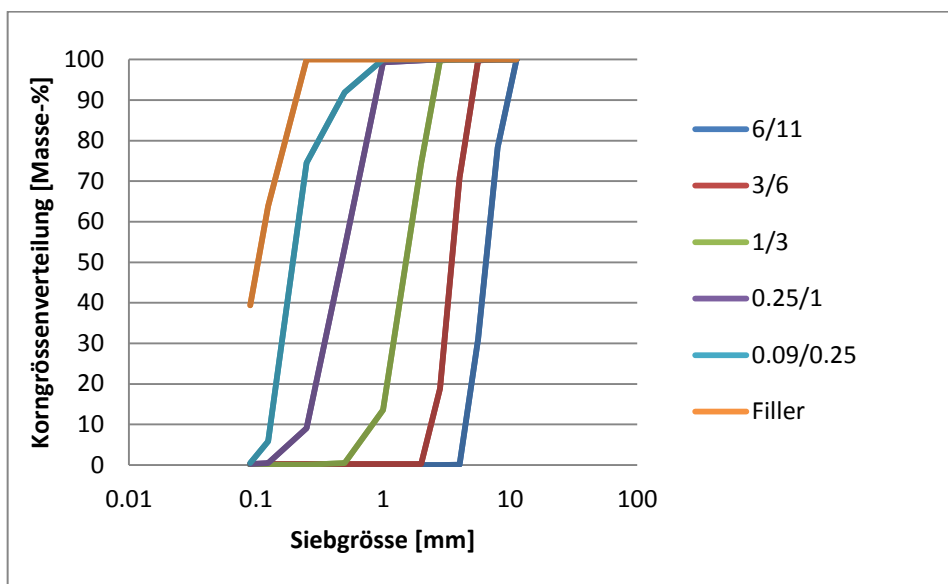


Abbildung 7: Korngrößenverteilung der Korngruppen des Minerals A

4.1.2 Bindemittel

Die Eigenschaften des Bindemittels 70/100 sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12: Eigenschaften des Bindemittels 70/100

Penetration, 25°C	0.1mm	77
Erweichungspunkt R&K	°C	47.4
Brechpunkt nach Fraass	°C	-17
Lösliches in Toluol	Masse-%	99.96
Dichte, 25°C	kg/m ³	1034
Duktilität	mm	1450
Dynamische Viscosität bei 60°C	Pa•s	129
Dynamische Viscosität bei 130°C	Pa•s	0.4

4.2 Untersuchen des Mischgutes

4.2.1 Kontrollprüfungen an Mischgut

Die Ergebnisse der Kontrollprüfung am Mischgut mit Mineralstoff B sind in Tabelle 13 und Abbildung 8 gezeigt.

Tabelle 13: Korngrößenverteilung des Mischgutes mit Mineralstoff B

Prüfsieb [mm]	63	45	31.5	22.4	16	11.2	8	5.6	4	2.8	2	1	0.5	0.25	0.13	0.09
Siebdurchgang [Masse %]	100	100	100	100	100	100	90.6	75.3	58.4	48.8	40	28.7	20.7	14.4	11.2	9.8

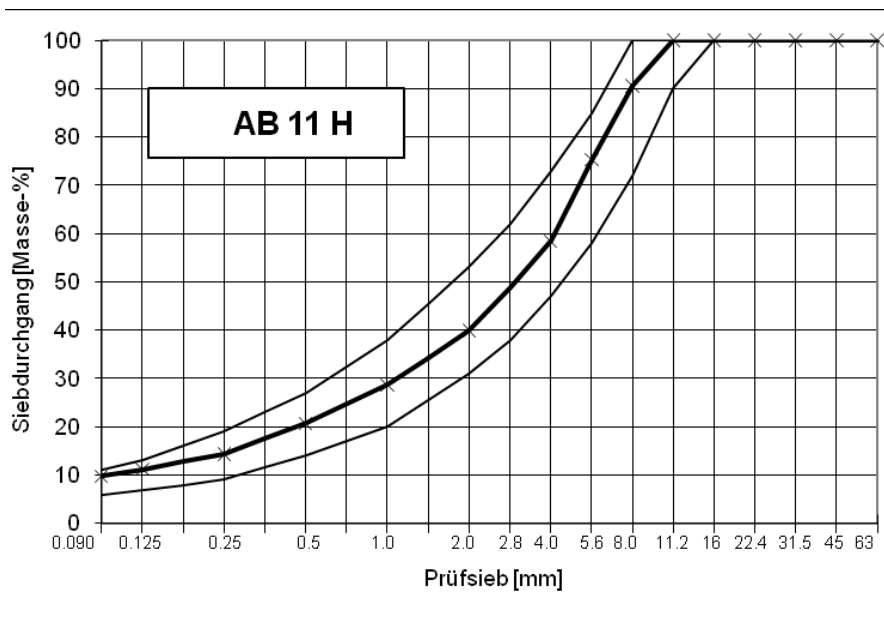


Abbildung 8: Korngrößenverteilung des Mischgutes mit Mineralstoff B

4.2.2 Bestimmen des Umhüllungsgrades

Der Umhüllungsgrad wurde an abgesiebten Fraktionen 8/11 der Splitte A, B, D, F, N mit verschiedenen Bindemitteln bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengestellt.

Tabelle 14: Umhüllungsgrade für Kombinationen von Bindemitteln und Mineralstoffen

Bindemittel:	Colflex N 55	B 55/65	B 70/100	Mittelwerte über Bindemittel
Mischtemperatur:	165 °C	155 °C	145 °C	
Mineralstoffe:				
A	36 %	35 %	22 %	31 %
B	93 %	86 %	58 %	79 %
D	48 %	48%	29%	42 %
F	39 %	37 %	25 %	34 %
N	74 %	61 %	42 %	59 %
Mittelwert über die Mineralstoffe	58%	53%	35%	47%

Die Tabelle 14 zeigt, dass die verwendeten Mineralstoffe deutlich unterschiedliche Umhüllungsgrade aufweisen und insbesondere der Mineralstoff A generell tiefe Werte liefert. Der Einfluss der Bindemittel auf den Kennwert (35% bis 58 %) ist dabei geringer als der der Mineralstoffe (31% bis 79%). Der Umhüllungsgrad der beiden weicheren Bitumen ist tiefer als der des harten und des modifizierten Bitumens.

4.3 Prüfen der Prüfkörper

4.3.1 Kontrolluntersuchungen

An zwei Serien von Prüfkörpern für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit nach Luft- und Wasserlagerung wurde die bei der Prüfkörperherstellung openporiger Gyratorkörper erreichte Homogenität anhand der Kennwerte Raumdichte und Hohlraumgehalt ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengestellt.

Tabelle 15: Raumdichte und Hohlraumgehalt der Prüfkörper B

Prüfkörpernummer	Raumdichte [kg/m ³]		Hohlraumgehalt [Vol-%]	
	für Bestimmung nach Luftlagerung	für Bestimmung nach Wasserlagerung	für Bestimmung nach Luftlagerung	für Bestimmung nach Wasserlagerung
1	2095	2150	19.1	17.0
2	2090	2080	19.3	19.7
3	2112	2113	18.5	18.4
4	2122	2083	18.1	19.6
5	2108	2119	18.6	18.2
6	2090	2077	19.3	19.8
Mittelwert	2103	2104	18.8	18.8

Fazit: Die Schwankungen in der Raumdichte und im Hohlraumgehalt liegen im Bereich der Bestimmungsgenauigkeit.

Die Tabelle 16 zeigt die Untersuchung der Variation in Gyratorprüfkörpern durch Vergleich des oberen und unteren Teils anhand des Kennwertes der Raumdichte. Verwendet wurden Prüfkörper mit Mineralstoffen A, M und B.

Tabelle 16: Unterschiede zwischen der oberen und unter Hälfte der Gyratorprüfkörper anhand der Raumdichten, Prüfkörper aus Mischungen der Mineralstoffe, A, M und B

Mineralstoffe	Raumdichte		Unterschied	Raumdichte	
	ganzer PK	obere Hälfte		untere Hälfte	Unterschied
	kg/m ³	kg/m ³	[%]	kg/m ³	[%]
A	2352	2360	0.33	2356	0.25
B	2394	2393	0.00	2398	0.18
M	2372	2375	0.11	2371	-0.05

Fazit: Die Unterschiede liegen im Bereich der Bestimmungsgenauigkeit. Die Ergebnisse bestätigen somit die Wahl der Verdichtungsmethode.

An den gleichen Gyratorprüfkörpern wurden die Unterschiede der Spaltzugfestigkeiten zwischen der oberen und unteren Hälfte untersucht. Die Resultate sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Vergleich der Spaltzugfestigkeit der unteren und oberen Hälfte von Gyrotorprüfkörpern mit Mineralstoffen A, B und M

Mineralstoffe	untere Hälfte		obere Hälfte	
	Ablesung Spaltzugkraft	Spaltzugfestigkeit	Ablesung Spaltzugkraft	Spaltzugfestigkeit
	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
A	11.1	1.09	10.6	1.06
B	9.3	0.92	8.7	0.89
M	10.4	1.03	9.8	0.98

Fazit: Die Spaltzugfestigkeiten von den zwei Hälften sind gemessen an der unten abgeschätzten Standardabweichung von 0.31 kN (siehe Tabelle 33), was einer Wiederholbarkeit von etwa 0.9 kN entspricht, nahezu identisch. Das bestätigt nochmals die Wahl der Verdichtungsmethode. Die Spaltzugfestigkeiten der drei verschiedenen Mischgüter unterscheiden sich wenig, die Unterschiede liegen ebenfalls im Bereich der Bestimmungsgenauigkeit der Prüfverfahren.

4.3.2 Spaltzugprüfung

Vorversuch 1 zur Lagerungsdauer FTN₅₀

Ein in genügender Menge vorhandenes Mischgut SMA 11 wurde für Vorversuche eingesetzt und einmal normal (gemäss [EN 12697-23]), für diese Forschung aber auch gezielt weniger verdichtet (2 x 40 statt 50 Schläge Marshall). Die Eigenschaften der so hergestellten Prüfkörper sind in Tabelle 18 und die Ergebnisse der Spaltzugprüfung, die Mittelwerte von drei Einzelprüfungen, in Tabelle 19 zusammengestellt.

Tabelle 18: Eigenschaften der Marshallprüfkörper für den Vorversuch 1

Bezeichnung	SMA 11S			
Bindemittel	Bitumen 50/70			
Zusätze	NAF 501			
Anzahl Schläge	2 x 50		2 x 40	
Hohlraumfüllungsgrad	71.4	%	65.0	%
löslicher Bindemittelgehalt	5.80	Masse-%	5.80	Masse-%
Raumdichte Marshall	2320	kg/m ³	2279	kg/m ³
Hohlraumgehalt Marshall	5.23	Vol.-%	6.90	Vol.-%
Stabilität Marshall	6.3	kN	n.b.	
Fliessen Marshall	3.3	mm	n.b.	

Tabelle 19: Spaltzugresultate nach Lagerung FT1 (FTN₅₀) an SMA-Prüfkörpern

	Referenzwert	FT1 (FTN ₅₀)	
	(ohne FT-Beanspruchung)	nach 40 Zyklen	nach 80 Zyklen
Anzahl Prüfkörper	3	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol.-%]	7.11	6.86	6.74
Ablesung Spaltzugkraft [kN]	12.3	10.8	11.1
Spaltzugfestigkeit [N/mm²]	1.14	1.01	1.04
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	100.0	88.3	91.2

Fazit: Es ist keine eindeutige Veränderung der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Prüfkörper festzustellen.

Vorversuch 2 zur Lagerungsdauer FTN₅₀, kombiniert mit Wasserlagerung

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsserie (wiederum jeweils Mittelwerte von drei Einzel-

prüfungen) mit dem gleichen Mischgut aber unter verschärften Lagerungsbedingungen sind in Tabelle 20 dargestellt. Als Referenzwert wurden die Bestimmungen an den Prüfkörpern aus dem ersten Vorversuch verwendet (siehe Tabelle 19). In Tabelle 20 ist eine wiederholte Prüfung nach Wasserlagerung eingeschlossen, wobei diese geringfügig modifiziert wurde.

Tabelle 20: Spaltzugresultate nach Lagerungen im Wasser (WL1, WL2) sowie Lagerung FT2 (40, 80 Zyklen) an SMA-Prüfkörpern

	nach Wasserlagerung		FT2 (FTN ₅₀)	
	WL1	WL2	nach 40 Zyklen	nach 80 Zyklen
Anzahl Prüfkörper	3	3	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol.-%]	6.78	6.94	6.50	6.00
Ablese Spaltzugkraft [kN]	10.6	10.4	10.1	10.6
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	1.00	0.97	0.96	1.01
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	87.4	85.2	84.1	88.3

Fazit: Die mechanischen Kennwerte liegen im Vergleich zum Referenzwert geringfügig tiefer. Ansonsten ist keine signifikante Veränderung der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Prüfkörper festzustellen. Die beiden Bestimmungen nach Wasserlagerung ergeben innerhalb der Messgenauigkeit gleiche Resultate.

Vorversuch 3 zur Lagerungsdauer FTN₅₀, kombiniert mit Wasserlagerung

Ein alternatives Mischgut AC 11N wurde anstelle des SMA eingesetzt und für diese Forschung gezielt weniger verdichtet (2 x 40 Schläge Marshall). Die Eigenschaften der so hergestellten Prüfkörper sind in Tabelle 21 und die Ergebnisse der Spaltzugprüfung, die Mittelwerte von drei Einzelprüfungen, in Tabelle 22 zusammengestellt.

Tabelle 21: Eigenschaften der Marshallprüfkörper für den Vorversuch 3

Bezeichnung	AC 11N	
Bindemittel	Bitumen 70/100	
Anzahl Schläge	2 x 40	
Hohlraumfüllungsgrad	79.4	%
löslicher Bindemittelgehalt	5.78	Masse-%
Raumdicke Marshall	2365	kg/m ³
Hohlraumgehalt Marshall	3.43	Vol.-%
Stabilität Marshall	n.b.	
Fließen Marshall	n.b.	

Tabelle 22: Spaltzugresultate nach Luftlagerung sowie nach Wasserlagerung WL2 und Wechsellagerung FT2 (FTN₅₀) an AC 11-Prüfkörpern

	Referenz	nach Wasserlagerung	nach Wasser und Luftlagerung	nach Frost-Tau-Wechsel	
		WL2	WL2 und LL	FT2 (FTN ₅₀) nach 40 Zyklen	nach 80 Zyklen
Anzahl Prüfkörper	3	3	3	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol.-%]	3.59	3.06	3.10	3.55	3.53
Ablese Spaltzugkraft [kN]	13.9	9.9	10.0	12.5	12.5
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	1.41	1.00	1.01	1.26	1.27
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	100.0	71.3	71.9	89.7	90.0

Fazit: Eine eindeutige Veränderung der mechanischen Eigenschaften ist nach der Was-

serlagerung festzustellen; der untersuchte Belag AC scheint wasserempfindlich zu sein. Erstaunlicherweise ist die Spaltzugfestigkeit nach FT-Beanspruchung höher als nach der Wasserlagerung. Die Ergebnisse nach einer zusätzlichen, 24-stündigen Luftlagerung bei einer Prüftemperatur von 25 °C zeigt, dass die Erniedrigung also nicht einem Nachwirken der thermischen Einwirkung bei 60 °C sondern dem Wassereinfluss zuzuschreiben ist. Für die hohe Spaltzugfestigkeit nach der FT-Belastung haben die Forschungsstellen keine Erklärung.

Vorversuch 4 zur Lagerungsdauer FTN₅₀, kombiniert mit Wasserlagerung

Ein Probemischgut AC 11N mit einem tiefen Umhüllungsgrad wurde einmal ohne und einmal mit Haftmittel eingesetzt und für diese Forschung normal und gezielt weniger verdichtet (2 x 40 Schläge Marshall). Die Eigenschaften der so hergestellten Prüfkörper ohne Haftmittel sind in Tabelle 23 und mit Haftmittel in Tabelle 24 zusammengestellt. Die Ergebnisse der Spaltzugprüfung für verschiedene Lagerungsarten (jeweils Mittelwerte von drei Einzelprüfungen) werden für die Prüfkörper ohne Haftmittel in Tabelle 25 und für die mit Haftmittel in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 23: Eigenschaften des Mischgutes AC 11 N ohne Haftmittel mit einem Umhüllungsgrad deutlich < 80%

Bezeichnung	AC 11 N			
Splitt	F			
Bindemittel	Bitumen 70/100			
Zusätze	ohne Haftmittel			
Umhüllungsgrad Splitt 11/8	39	%		
Anzahl Schläge	2 x 50		2 x 40	
Hohlraumfüllungsgrad	66.0	%	66.0	%
löslicher Bindemittelgehalt	5.71	Masse-%	5.71	Masse-%
Raumdichte Marshall	2291	kg/m ³	2290	kg/m ³
Hohlraumgehalt Marshall	6.57	Vol.-%	6.61	Vol.-%
Stabilität Marshall	5.8	kN	n.b.	
Fliessen Marshall	3.0	mm	n.b.	

Tabelle 24: Eigenschaften des Mischgutes AC 11 N mit Haftmittel mit einem Umhüllungsgrad deutlich > 80%

Bezeichnung	AC 11 N			
Splitt	F			
Bindemittel	Bitumen 70/100			
Zusätze	mit Haftmittel			
Umhüllungsgrad Splitt 11/8	95	%		
Anzahl Schläge	2 x 50		2 x 40	
Hohlraumfüllungsgrad	68.6	%	66.8	%
löslicher Bindemittelgehalt	5.75	Masse-%	5.75	Masse-%
Raumdichte Marshall	2306	kg/m ³	2294	kg/m ³
Hohlraumgehalt Marshall	5.88	Vol.-%	6.37	Vol.-%
Stabilität Marshall	5.6	kN	n.b.	
Fliessen Marshall	2.8	mm	n.b.	

Tabelle 25: Spaltzugresultate in Abhängigkeit von der Lagerung bei Mischgut AC 11 ohne Haftmittel

	Referenz	nach Wasser- und Luftlagerung		Wasserlagerung gefolgt von Luftlagerung und Frost-Tau-Wechseln, 120 Zyklen			
		WL2, 24 h	WL3, 72 h	WL2, 24 h	WL2, 24 h	WL3, 72 h	WL3, 72 h
				FT3 (FTN ₅₀)	FT4 (N ₅₀)	FT3 (FTN ₅₀)	FT4 (N ₅₀)
Anzahl Prüfkörper	3	3	3	3	3	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol.-%]	7.00	6.61	6.21	6.58	6.44	6.28	6.61
Ablesung Spaltzugkraft [kN]	9.2	8.3	6.3	5.9	5.7	3.8	3.4
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	0.88	0.79	0.61	0.57	0.55	0.36	0.32
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	100	88.9	69.8	64.1	61.9	41.1	36.8

Tabelle 26: Spaltzugresultate in Abhängigkeit von der Lagerung bei Mischgut AC11 mit Haftmittel

	Referenz	nach Wasser- und Luftlagerung		Wasserlagerung gefolgt von Luftlagerung und Frost-Tau-Wechseln, 120 Zyklen			
		WL2, 24 h	WL3, 72 h	WL2, 24 h	WL2, 24 h	WL3, 72 h	WL3, 72 h
				FT3 (FTN ₅₀)	FT4 (N ₅₀)	FT3 (FTN ₅₀)	FT4 (N ₅₀)
Anzahl Prüfkörper	3	3	3	3	3	3	3
Hohlraumgehalt Marshall	6.15	6.63	6.50	6.28	6.31	6.78	6.42
Ablesung Spaltzugkraft [kN]	8.9	10.9	10.2	8.7	6.6	7.9	6.5
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	0.86	1.04	0.98	0.84	0.64	0.76	0.63
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	100	120.9	113.5	97.3	73.8	88.7	72.7

Spaltzugversuche an Mischungen aus Mineralstoffen A und B

Der Einfluss der Lagerung auf die mechanische Stabilität der Gyratorprüfkörper aus den Mineralstoffen A, B und M sind in den Tabellen 27 bis 29 dargestellt. Tabelle 30 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 27: Einfluss der Lagerung auf die Spaltzugfestigkeit von Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff A

	Referenz, A	Wasserlagerung W3	Frost-Tau-Wechsel, zusätzlich
		72 h / 60°C	FT4 (N ₅₀)
Anzahl Prüfkörper / Hälfte	3 / obere	3 / untere	3 / obere
Raumdicke [kg/m ³]	2359	2360	2362
Rohdicke [kg/m ³]	2475		
HRG [Vol.-%]	4.69	4.65	4.66
Ablesung Spaltzugkraft [kN]	11.7	6.6	3.5
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	1.16	0.66	0.35
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	100	56.4	29.7

Tabelle 28: Einfluss der Lagerung auf die Spaltzugfestigkeit von Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff M

	Referenz, M	Wasserlagerung WL3 72 h / 60°C	Frost-Tau-Wechsel, zusätzlich FT4 (N ₅₀)
Anzahl Prüfkörper / Hälfte	3 / obere	3 / untere	3 / obere
Raumdichte [kg/m ³]	2376	2379	2376
Rohdichte [kg/m ³]	2492		
HRG [Vol-%]	4.64	4.52	4.66
Ablesung Spaltzugkraft [kN]	10.5	7.4	3.4
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	1.06	0.74	0.33
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	100	69.7	31.3

Tabelle 29: Einfluss der Lagerung auf die Spaltzugfestigkeit von Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff B

	Referenz, B	Wasserlagerung WL3 72 h / 60°C	Frost-Tau-Wechsel, zusätzlich FT4 (N ₅₀)
Anzahl Prüfkörper / Hälfte	3 / oben	3 / untere	3 / obere
Raumdichte [kg/m ³]	2390	2401	2362
Rohdichte [kg/m ³]	2509		
HRG [Vol-%]	4.73	4.30	4.53
Ablesung Spaltzugkraft [kN]	9.5	4.4	2.7
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	0.95	0.44	0.26
Relative Spaltzugfestigkeit [%]	100	46.8	28.0

Tabelle 30: Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Lagerung auf Gyratorprüfkörper mit Mineralstoffen A, B und M

	Referenz	Wasserlagerung WL3 72 h / 60°C	Frost-Tau-Wechsel, zusätzlich FT4 (N ₅₀)
Relative Spaltzugfestigkeit [%] von			
A	100	56.4	29.7
B	100	46.8	28.0
M	100	69.7	31.3

Fazit: Die sukzessiv strengeren Lagerungsbedingungen führen unabhängig vom Mineralstoffgemisch zu einer Abnahme der Festigkeit.

Vergleichsbestimmungen Empa

Die Wasserempfindlichkeit wurde mit dem Spaltzug bestimmt, wobei von den beiden Hälften eines Gyratorkörpers jeweils je eine an der Luft gelagert und die andere im Wasser konditioniert wurde. Tabelle 31 zeigt die Einzelwerte an Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoffen B, Tabelle 32 fasst die Mittelwerte für Gyratorprüfkörper aus den Mineralstoffen A, B, C und M zusammen.

Tabelle 31: Wasserempfindlichkeit B, Einzelwerte

Prüfkörper Nummer	Festigkeit [kPa]		Wasserempfindlichkeit, ITSR [%]
	Luftlagerung	Wasserlagerung	
1	419.1	486.9	116
2	417.3	426.4	102
3	424.8	474.1	112
4	378.9	495.7	131
5	391.5	387.5	99
6	411.7	448	109
Mittel	407.2	453.1	111

Tabelle 32: Wasserempfindlichkeit ITSR, Mittelwerte, an Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoffen A, B, C und M

Mix	Festigkeit [kPa]		Wasserempfindlichkeit, ITSR [%]
	Luftlagerung	Wasserlagerung	
A	516.7	542.5	105
B	407.2	453.1	111
C	526.9	513.7	97
M	430.4	490.0	114

Fazit: Es konnte keine Abnahme der Festigkeit als Folge der Wasserlagerung festgestellt werden. Das ist in Übereinstimmung mit den oben aufgeführten Untersuchungen, bei denen eine Abnahme nur bei sehr verschärften Bedingungen festgestellt werden konnte.

Berechnung der Streuungen der Spaltzugprüfung

Die Grundlagen der Berechnung sind in Kapitel 3.4, Standardabweichung der Spaltzugprüfung beschrieben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 33 zusammengefasst. Die gefundenen Standardabweichungen sind weder vom geprüften Material noch von der absoluten Grösse abhängig. Es ist deshalb zulässig, eine durchschnittliche Standardabweichung als Mass für die Messunsicherheit aller dieser Spaltzugprüfungen zu verwenden. Um auf die Standardabweichungen der Mittelwerte zu kommen, wäre die der Einzelwerte nach dem zentralen Grenzwertsatz noch durch die Wurzel der Anzahl der Einzelwerte zu dividieren, also im vorliegenden Falle durch 1.732. Da immer 3^{er}-Serien vorlagen wurde diese Division erst nach der Mittelwertbildung der Standardabweichungen durchgeführt. Das ergibt als mittlere Standardabweichung der Mittelwerte der 3^{er}-Serien 0.313 [kN].

In dieser Forschung interessiert aber prinzipiell die prozentuale Veränderung gegenüber Referenzwerten als Mass für den Einfluss der untersuchten Lagerungen. Deshalb wurden die Standardabweichungen in eine prozentuale, auf die jeweilige Referenz bezogene Abweichung umgerechnet. Die Werte sind in der letzten Kolonne der Tabelle 33 aufgeführt, ihr Mittel ist 5.52 [%]. Auch in diesem Fall ist durch 1.732 zu dividieren, aber, da auch die Referenz einen Fehler aufweisen kann, zugleich mit Wurzel aus 2 (1.414) zu multiplizieren was 4.50 [%] ergibt. Angenommen wird bei diesem Berechnungsverfahren das gleiche Streuungsverhalten bei Bestimmungen am gelagerten und nicht gelagerten Material. Das ist sowohl in Anbetracht der langjährigen Erfahrungen mit dieser Prüfung als auch angesichts der vorliegenden Ergebnisse vertretbar.

Tabelle 33: Standardabweichungen der Einzelwerte und des Mittelwertes der Spaltzugprüfung

Asphalt-Prüfkörper	Einzelwerte [kN]			Stabw. [kN]	Stabw. [kN-%]
SMA 11; Marshall bei 2x40	12.2	11.0	13.6	1.30	Ref.
	9.8	9.7	13.0	1.88	15.3
	11.0	10.3	12.1	0.91	7.4
SMA 11; Marshall bei 2x40	11.2	10.1	10.4	0.57	4.6
	10.3	10.0	9.9	0.21	1.7
	9.8	11.1	10.8	0.68	5.5
SMA 11; Marshall 2x40	10.3	10.8	10.1	0.36	2.9
AC 11 N; Marshall 2x40	14.2	13.8	13.8	0.23	Ref.
	10.1	10.0	9.7	0.21	1.7
	12.7	12.1	12.7	0.35	2.8
	12.2	13.3	12.1	0.67	5.4
	10.2	9.4	10.3	0.49	4.0
AC 11 N / B80/100 ohne Haftmittel Marshall 2x40	9.1	9.5	9.0	0.26	Ref.
	8.6	8.6	7.6	0.58	6.3
	6.7	5.6	5.4	0.70	7.6
	5.0	5.0	7.0	1.15	12.6
	6.7	6.4	5.8	0.46	5.0
	4.3	3.1	3.9	0.61	6.6
	3.5	3.5	3.1	0.23	2.5
AC 11 N / B80/100 mit Haftmittel Marshall 2x40	8.5	8.5	9.7	0.693	Ref.
	10.7	11.3	10.6	0.38	4.3
	8.9	8.1	9.1	0.53	5.9
	6.9	7.2	5.7	0.79	8.9
	10.1	10.1	10.4	0.17	1.9
	7.5	7.3	9.0	0.93	10.4
halbierte GyratorPK, Mineralstoff A	6.2	6.1	7.1	0.55	6.2
	11.7	11.4	12.0	0.30	Ref.
	6.0	6.9	7.0	0.55	4.7
halbierte GyratorPK, Mineralstoff B	3.5	3.4	3.6	0.10	0.9
	9.4	9.3	9.7	0.21	Ref.
	5.2	4.4	3.2	1.01	10.6
halbierte GyratorPK, Mineralstoff M	2.8	2.3	2.9	0.32	3.4
	10.5	10.5	10.6	0.06	Ref.
	7.0	7.6	7.5	0.32	3.1
	3.5	3.1	3.5	0.23	2.2
Mittelwert aller Standardabweichungen der Einzelwerte				0.543	5.52
Verwendete Streuung auf Basis der Schätzung der Standardabweichungen der Mittelwerte unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung				0.313	4.50

4.3.3 Druck-Schwellprüfung

Vorversuch 1 zu Lagerungsbedingungen für Druck-Schwellprüfungen

Die Ergebnisse der ersten Versuchsserie (jeweils der Mittelwerte von drei Einzelprüfungen) sind in Tabelle 34 zusammengestellt. Für die Eigenschaften der Prüfkörper siehe die Tabelle 18 oben.

Tabelle 34: Abhängigkeit der Steigung im Wendepunkt von der Zyklenzahl der Frost-Tau-Wechsel

	Referenzwert (ohne FT-Beanspruchung)	FT1 (FTN ₅₀)	
		nach 40 Zyklen	nach 80 Zyklen
Anzahl Prüfkörper	3	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol-%]	7.14	7.13	6.49
Relative Steigung im Wendepunkt [%/10000 Lastwechsel]	60	64	53
Relative Steigung im Wendepunkt [%]	100.0	106.7	88.3

Fazit: Es ist keine eindeutige Veränderung der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Prüfkörper festzustellen.

Vorversuch 2 zu Lagerungsbedingungen für Druck-Schwellprüfungen

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsserie (wiederum jeweils Mittelwerte von drei Einzelprüfungen) mit dem gleichen Mischgut aber unter verschärften Lagerungsbedingungen sind in Tabelle 35 dargestellt. Als Referenzwert wurden die Bestimmungen an den Prüfkörpern aus dem ersten Vorversuch verwendet. In Tabelle 35 ist eine wiederholte Prüfung nach Wasserlagerung eingeschlossen, wobei diese geringfügig modifiziert wurde.

Tabelle 35: Abhängigkeit der Steigung im Wendepunkt von Lagerungsbedingungen, Wasserlagerung gefolgt von Frost-Tau-Wechsel mit zwei Zyklenzahlen

	nach Wasserlagerung		FT2 (FTN ₅₀)	
	WL1	WL2	nach 40 Zyklen	nach 80 Zyklen
Anzahl Prüfkörper	3	3	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol-%]	6.21	6.58	6.74	6.94
Relative Steigung im Wendepunkt [%/10000 Lastwechsel]	54	60	83	79
Relative Steigung im Wendepunkt [%]	90.0	100.0	138.3	88.3

Fazit: Mit dem Druckschwellversuch ist nach 40 Zyklen FT-Beanspruchung eine Zunahme der Steigung (d.h. eine leichtere Verformbarkeit) feststellbar, hingegen verursachen doppelt so viele Lagerungszyklen keine Veränderungen gegenüber der ungelagerten Referenz. Die beiden Bestimmungen nach Wasserlagerung ergeben nur unwesentliche Unterschiede in den Resultaten.

Vorversuch 4 zu Lagerungsbedingungen für Druck-Schwellprüfungen

Die Ergebnisse der Bestimmungen an Mischgut ohne Haftmittel sind in Tabelle 36 zusammengestellt. Für die Eigenschaften der Prüfkörper siehe Tabelle 23 oben.

Tabelle 36: Einfluss der Wasserlagerung und von Frost-Tau-Wechseln auf Marshallprüfkörper mit Bindemittel ohne Haftmittel

	Referenzwert	Wasserlagerung gefolgt von Luftlagerung und Frost-Tau-Wechseln, 120 Zyklen
	(ohne Wasserlagerung)	WL2 und FT3
Anzahl Prüfkörper	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol-%]	6.55	7.01
Relative Steigung im Wendepunkt [%/10000 Lastwechsel]	66	69
Relative Steigung im Wendepunkt [%]		104.5

Fazit: Nach Wasserlagerung und 120 Zyklen Frost-Tau-Wechseln ist keine Zunahme der Steigung (d.h. leichtere Verformbarkeit) feststellbar.

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsserie an Mischgut mit Haftmittel sind in Tabelle 37 zusammengestellt. Für die Eigenschaften der Prüfkörper siehe die Tabelle 24 oben.

Tabelle 37: Einfluss der Wasserlagerung und von Frost-Tau-Wechseln auf Marshallprüfkörper mit Bindemittel mit Haftmittel

	Referenzwert	Wasserlagerung gefolgt von Luftlagerung und Frost-Tau-Wechseln, 120 Zyklen
	(ohne Wasserlagerung)	WL2 und FT3
Anzahl Prüfkörper	3	3
Hohlraumgehalt Marshall [Vol-%]	5.63	6.70
Relative Steigung im Wendepunkt [%/10000 Lastwechsel]	36	62
Relative Steigung im Wendepunkt [%]		172.2

Fazit: Nach Wasserlagerung und 120 Zyklen Frost-Tau-Wechseln ist eine ausgeprägte Zunahme der Steigung (d.h. leichtere Verformbarkeit) feststellbar. Im Vergleich mit der fehlenden Zunahme der Steigung bei Prüfkörpern ohne Haftmittel widerspricht das Ergebnis den Erwartungen.

4.3.4 Modulbestimmung mit der Spaltzugprüfung

Mit einer Versuchsserie gemäss [EN 12697-26] wurde geprüft, wie geeignet die einfach durchzuführende Bestimmung des komplexen Moduls mit Hilfe des Versuchsaufbaus der Spaltzugprüfung ist, um den Einfluss der Lagerung nach Norm auf Prüfkörper zu bestimmen. Dabei wurde die Modulbestimmung doppelt durchgeführt, indem der Prüfkörper nach der ersten Bestimmung um 90 °C gedreht wurde. Die Ergebnisse nach der Prüfkörperherstellung sind in Tabelle 38 dargestellt. Anschliessend wurde eine Hälfte der Prüfkörperreihe der Wasserlagerung nach Norm unterzogen, die andere wurde zwischenzeitlich unbehandelt aufbewahrt. Die Ergebnisse der an diesen Prüfkörpern durchgeführten Modulbestimmungen mit der Spaltzugprüfung sind in Tabelle 39 aufgeführt.

Tabelle 38: Modulwerte der Gyratorprüfkörper mit Mineralstoffen B und A nach Herstellung

Prüfkörper		B oben	B unten	A oben	A unten
		Modul	Modul	Modul	Modul
PK 1 Serie für Wasserlagerung	1. Modulwert [MPa]	3606	2846	6347	5148
	2. Modulwert [MPa]	3114	4112	4638	3569
	Mittelwert [MPa]	3360	3479	5492	4358
PK 2 Serie für Wasserlagerung	1. Modulwert [MPa]	10477*	4815	5968	4371
	2. Modulwert [MPa]	6279*	3583	6334	3589
	Mittelwert [MPa]	8378*	4199	6151	3980
PK1 und 2	Gesamtmittel [MPa]	3679		4996	
PK 3 Serie für Luftlagerung	1. Modulwert [MPa]	4627	3258	5376	4749
	2. Modulwert [MPa]	3499	3623	4540	4090
	Mittelwert [MPa]	4063	3440	4958	4420
PK 4 Serie für Luftlagerung	1. Modulwert [MPa]	3981	1971	---	---
	2. Modulwert [MPa]	3383	1479	---	---
	Mittelwert [MPa]	3682	1725	---	---
PK1 und 2	Gesamtmittel [MPa]	3228		4689	

*: Ausreisser für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 39: Modulwerte der Gyratorprüfkörper mit Mineralstoffen B und A nach Lagerung an Luft und in Wasser, Vergleich mit Werten nach Herstellung

Prüfkörper		B oben	B unten	A oben	A unten
		Modul	Modul	Modul	Modul
PK 1 Wasser- lagerung	1. Modulwert [MPa]	2522	2509	3693	3343
	2. Modulwert [MPa]	2384	2963	3465	3198
	Mittelwert [MPa]	2453	2736	3579	3270.5
PK 2 Wasser- lagerung	1. Modulwert [MPa]	4220	3237	4664	5083
	2. Modulwert [MPa]	4174	3173	4016	3433
	Mittelwert [MPa]	4197	3205	4340	4258
PK 1 und PK 2	Gesamtmittel [MPa]	2798		3862	
	[Modul-%] vor Lag.	76		77	
PK 3 Luft- lagerung	1. Modulwert [MPa]	4269	3407	4008	3255
	2. Modulwert [MPa]	3205	2656	4067	2853
	Mittelwert [MPa]	3737	3031.5	4037.5	3054
PK 4 Luft- lagerung	1. Modulwert [MPa]	3237	2036	---	---
	2. Modulwert [MPa]	2835	1828	---	---
	Mittelwert [MPa]	3036	1932	---	---
PK 3 und PK 4	Gesamtmittel [MPa]	2934		3546	
	[Modul-%] vor Lag.	91		76	

Fazit: Es kann kein systematischer Trend festgestellt werden.

4.3.5 Bestimmung des Komplexen Moduls mit dem Druck-Schwellversuch

Modulbestimmung bei 25 °C, trocken und unter Wasser

Die Druck-Schwellprüfung wurde wie im methodischen Teil beschrieben einmal an der Luft und einmal in Wasser durchgeführt. Es muss zwischen Prüfkörper und Sockel ein Behälter gestellt und einmal gefüllt werden, einmal nicht. Es werden hier nur die Ergeb-

nisse mit dem dünnwandigen Behälter gezeigt. Abbildungen 9 und 10 zeigt zwei Beispiele von Druck-Schwellprüfungen an Marshallprüfkörpern bei 25 °C, Vergleich der Werte am trockenen Prüfkörper und am Prüfkörper unter Wasser.

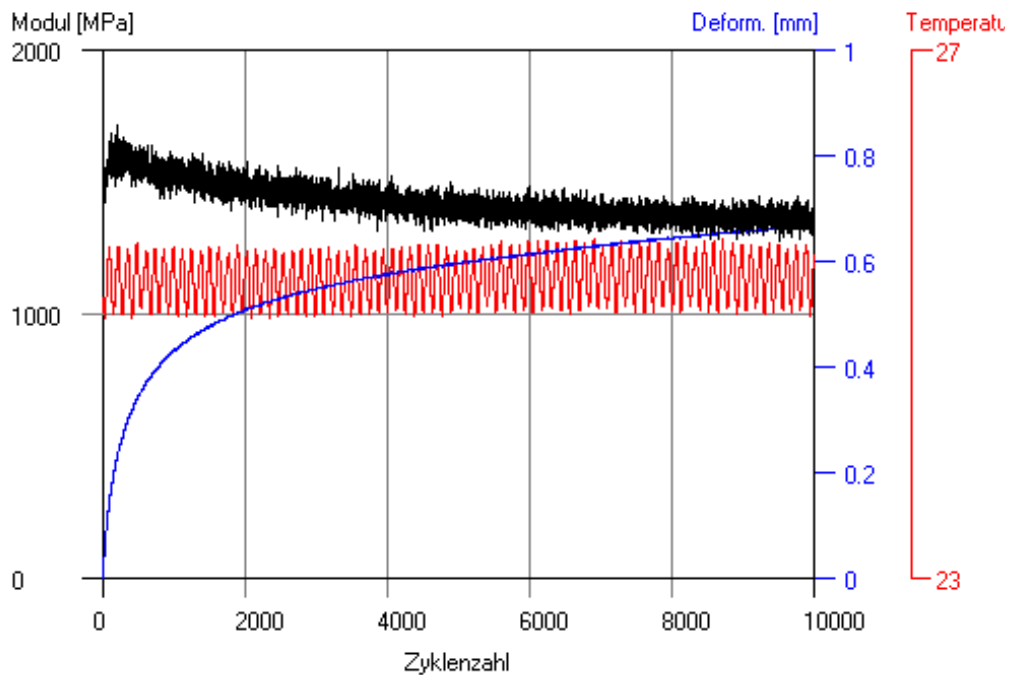


Abbildung 9: Druck-Schwellprüfung, Prüfkörper mit Mineralstoff M, trocken

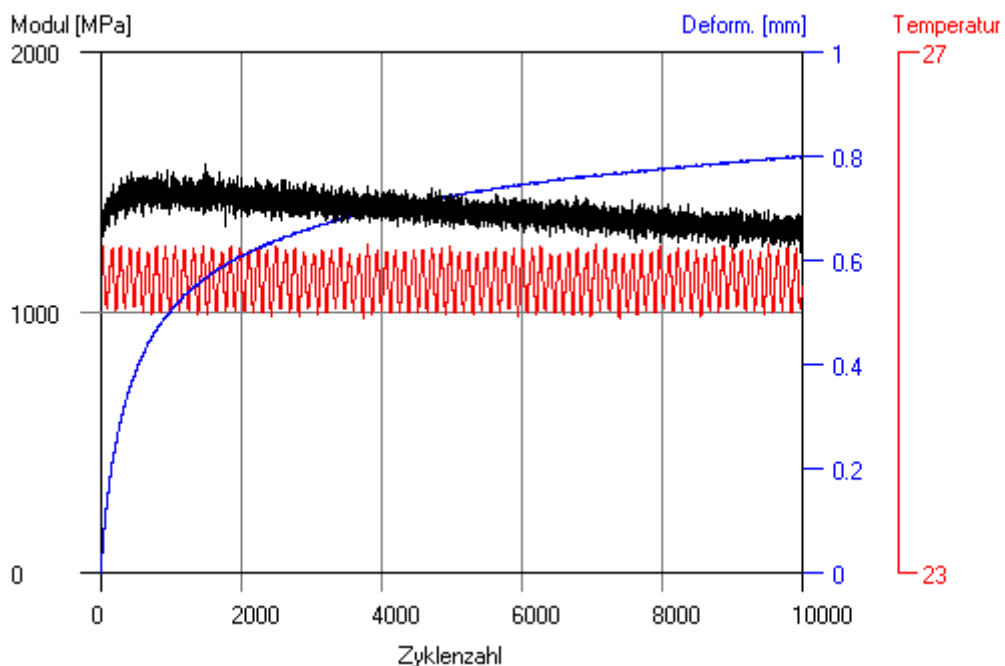


Abbildung 10: Druck-Schwellprüfung, Prüfkörper mit Mineralstoff M, unter Wasser

Tabellen 40 bis 42 zeigen die Ergebnisse der Modulbestimmungen an der Luft und unter Wasser an Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoffen M, A und C. Die Bestimmungen an den Gyratorprüfkörpern mit den Mineralstoffen B liessen sich nur teilweise auswerten, ein Vergleich unter Wasser und an der Luft konnte nicht gezogen werden. In Tabelle 43 sind die Ergebnisse der Gyratorprüfkörper aus den der Mineralstoffen A, C und M zusammengestellt.

Tabelle 40: Modulbestimmung mit Druck-Schwellprüfung, Prüfkörper mit Mineralstoff M

	trocken	unter Wasser
Anzahl verwendete Modulwerte	10	10
Modulmittel zu Beginn [MPa]	1377	1265
maximaler Modul [MPa]	1712	1568
bei Zyklus	214	1473
Modulverlust nach Maximum [Modul-%/Zyklus]	0.00196	0.00067
Anfangsverformung [mm]	4.371	4.6879
maximale Deformation [mm]	0.668	0.800
Solltemperatur [°C]	25	25

Tabelle 41. Modulbestimmung mit Druck-Schwellprüfung, Prüfkörper mit Mineralstoff A

	trocken	unter Wasser
Anzahl verwendete Modulwerte	10	10
Modulmittel zu Beginn [MPa]	1545	1327
maximaler Modul [MPa]	1834	1581
bei Zyklus	56	648
Modulverlust nach Maximum [Modul-%/Zyklus]	0.00225	0.0015
Anfangsverformung [mm]	4.749	4.66
maximale Deformation [mm]	0.451	0.546
Solltemperatur [°C]	25	25

Tabelle 42: Modulbestimmung mit Druck-Schwellprüfung, Prüfkörper mit Mineralstoff C

	trocken	unter Wasser
Anzahl verwendete Modulwerte	10	10
Modulmittel zu Beginn [MPa]	1504	1390
maximaler Modul [MPa]	1940	1783
bei Zyklus	336	427
Modulverlust nach Maximum [Modul-%/Zyklus]	0.00113	0.00137
Anfangsverformung [mm]		
maximale Deformation [mm]		
Solltemperatur [°C]	25	25

Tabelle 43: Zusammenstellung der Ergebnisse der Modulbestimmung mit dem Druck-Schwellversuch an Gyratorprüfkörpern A, C und M

	Modulmittel zu Beginn [MPa]		maximaler Modul [MPa]	
	trocken	unter Wasser	trocken	unter Wasser
A	1545	1327	1834	1581
C	1504	1390	1940	1783
M	1377	1265	1712	1568
		Abnahme [%]		Abnahme [%]
A		14.1		13.8
C		7.6		8.1
M		8.1		8.4

Fazit: Es ist ein erkennbarer, wenn auch nicht grosser, Unterschied zwischen den Materialien zu beobachten, aber es spielt keine Rolle, ob die Module zu Beginn oder beim maximalen Modul betrachtet werden. Das bedeutet, dass die verlängerte Belastung unter Wasser die gleiche Abnahme bewirkt wie sie zu Beginn besteht. Das zeigt, dass die

Wassersättigung zu Beginn und die Temperierung in der Prüfkammer für die Abnahme verantwortlich sind, nicht aber die Pulsbelastung während der Prüfung. Die Hoffnung auf eine einfachere Bestimmung (einfacher im Vergleich zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit mit dem CAST) der kombinierten Einwirkung mechanischer Belastung (hier Pulsbelastung) und von Wasser durch den Druck-Schwellversuch erfüllte sich somit nicht. Die Tatsache, dass die Modulabnahme nach dem Maximum einmal beim Prüfen an der Luft und einmal beim Prüfen unter Wasser grösser ist, steht völlig in Einklang mit dieser Bewertung.

Die mechanische Vorstellung ist, dass im Gegensatz zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit CAST (siehe unten) der Prüfkörper komprimiert wird und kaum lokale Dehnungen auftreten. Somit trägt die zyklische Belastung nur wenig dazu bei, die Ablösung des Bindemittelfilms durch Wasser zu fördern. Die graphische Darstellung der Verformung zeigt denn auch, dass (und das war gewollt) im nicht zerstörenden Bereich geprüft worden ist, was im Einklang mit dieser Hypothese steht.

4.3.6 Koaxialer Schubtest, Entwicklung des Moduls unter Wassereinfluss

Bei dieser Versuchsserie wurden die Prüfkörper soweit möglich mechanisch unbelastet einmal an der Luft und einmal im Wasser gelagert. In Abständen von zwei Stunden wurde eine Serie kurzzeitiger Belastungen aufgebraucht, um den Zustand der Prüfkörper durch Bestimmen des Moduls zu erfassen. Die so erfasste Entwicklung der mechanischen Eigenschaften an der Luft und unter Wasser ist für Prüfkörper mit Mineralstoffen A in Tabelle 44 numerisch und in Abbildung 11 graphisch dargestellt. Die Messzeit ist die mittlere Messzeit des der nach jeder Temperatur durchgeführten Messungen.

Tabelle 44: Vergleich der Entwicklung der Steifigkeit bei 40 °C an der Luft und unter Wasser anhand des komplexen Moduls bestimmt an Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff A

Messzeit	Modul an der Luft	Modul im Wasser	Verhältnis Wasser / Luft
[s]	[MPa]	[MPa]	[Modul-%]
7692	271.6	233.5	86.0
19370	263.9	228.2	86.5
31047	260.4	226.9	87.2
42723	261.5	229.4	87.7
54399	264.1	227.2	86.0
66075	261.6	226.7	86.7
77751	262.0	222.4	84.9
89427	264.1	220.3	83.4
101104	264.1	226.7	85.8
112780	262.5	221.9	84.5
124456	264.2	219.5	83.1
136132	264.3	223.1	84.4
147808	258.9	222.0	85.8
159483	260.9	222.6	85.3
171160	264.6	218.1	82.4
182836	264.2	223.5	84.6

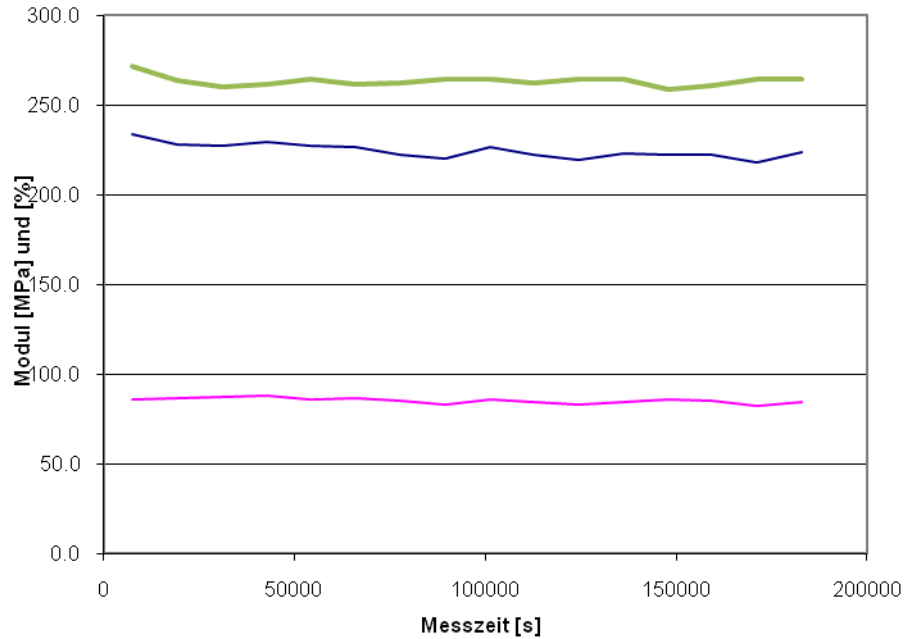


Abbildung 11: Entwicklung der Steifigkeit bei 40 °C an der Luft und unter Wasser anhand des komplexen Moduls bestimmt an Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff A

Die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften an der Luft und unter Wasser für Prüfkörper mit Mineralstoffen B ist in Tabelle 45 numerisch und in Abbildung 12 graphisch dargestellt.

Tabelle 45: Vergleich der Entwicklung der Steifigkeit bei 40 °C an der Luft und unter Wasser anhand des komplexen Moduls bestimmt an Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff B

Messzeit [s]	Modul an der Luft [MPa]	Modul im Wasser [MPa]	Verhältnis Wasser / Luft [Modul-%]
4489	173.9	167.9	96.5
16170	167.8	173.1	103.1
27847	174.1	160.5	92.2
39523	172.3	161.3	93.6
51199	172.8	164.2	95.0
62875	171.9	161.4	93.9
74551	172.5	159.1	92.2
86227	173.9	159.3	91.6
97904	175.6	158.1	90.0
109580	175.9	157.6	89.6
121256	174.7	158.3	90.6
132932	171.8	158.4	92.2
144608	173.4	158.7	91.5
156284	172.1	164.3	95.5
167960	173.3	156.9	90.5
179636	173.4	160.8	92.7

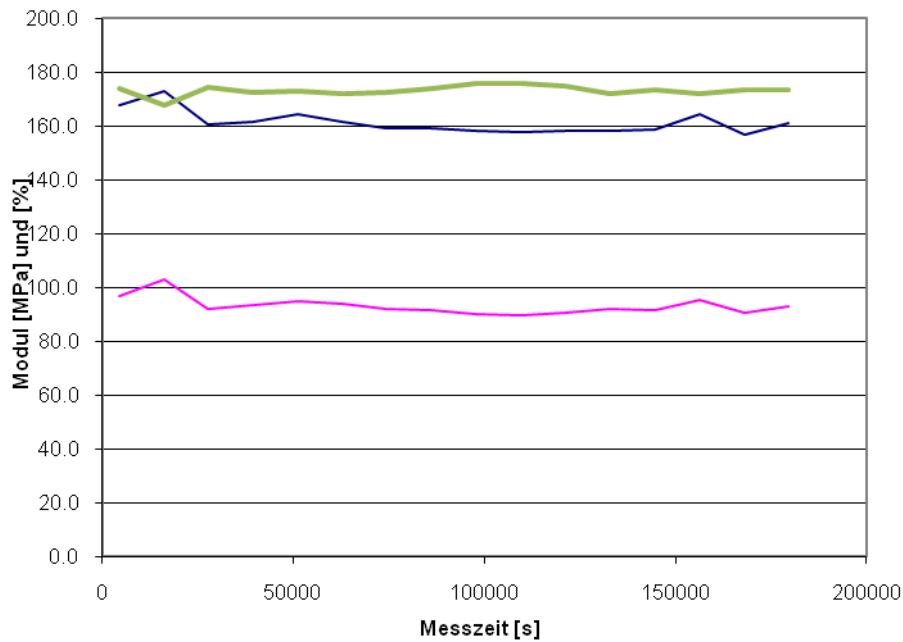


Abbildung 12: Entwicklung der Steifigkeit bei 40 °C an der Luft und unter Wasser anhand des komplexen Moduls bestimmt an Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff B

Fazit: Das Mineral A zeigt eine stärkere Abnahme der Steifigkeit, bei beiden tritt aber die Abnahme rasch ein, zum Teil vor der ersten mechanischen Belastung. Die Unterschiede sind aber gering, die Prüfung eignet sich also wenig, um die Wasserempfindlichkeit festzustellen.

Im Vergleich zum Druck-Schwellversuch (siehe oben) ist der Einfluss des Wassers zwar klarer festzustellen, doch ist im Gegensatz zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit CAST (siehe unten) keine fortschreitende Abnahme der Steifigkeit festzustellen. Der Vergleich mit dem Druck-Schwellversuch bestätigt die oben geäußerte These, dass das Komprimieren der Entwicklung der Schädigung entgegenwirkt. Der Vergleich mit der Wasserempfindlichkeit CAST hingegen zeigt, dass mechanische Belastung sehr wohl mit dem Wasser zusammenwirkt.

4.3.7 Wasserempfindlichkeit CAST

Mit der Prüfung Wasserempfindlichkeit CAST wird der kombinierte Einfluss von mechanischer Belastung und Temperatur erfasst. Die Prüfung ist praxisnah konzipiert, die Belastung ist ein Schub ähnlich wie er durch die Radlast des rollenden Verkehrs erzeugt wird (siehe Abbildung 2). Die Temperaturen (siehe Abbildungen 13 und 14) liegen zwischen 30 und 40 °C, also im feuchtwarmen Bereich, bei dem in der Praxis die rascheste Schädigung zu erwarten ist.

Abbildungen 13 und 14 zeigen den typischen Verlauf einer solchen Prüfung an der Luft und unter Einwirkung von Wasser

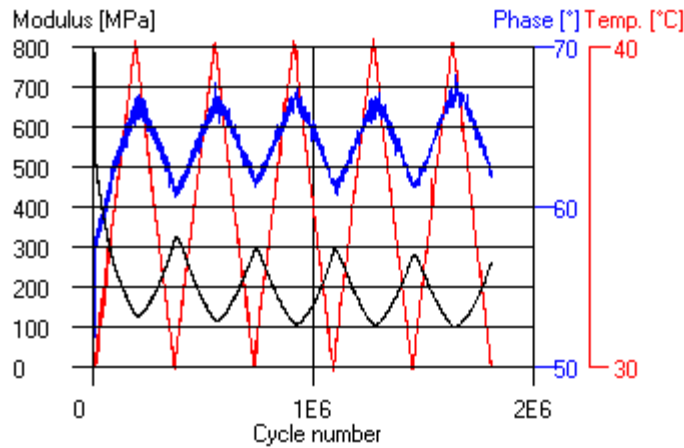


Abbildung 13: Entwicklung des Moduls, der Phasenverschiebung und der Temperatur als Funktion der Zyklenzahl. Gyrationprüfkörper mit Mineralstoff B, an der Luft geprüft.

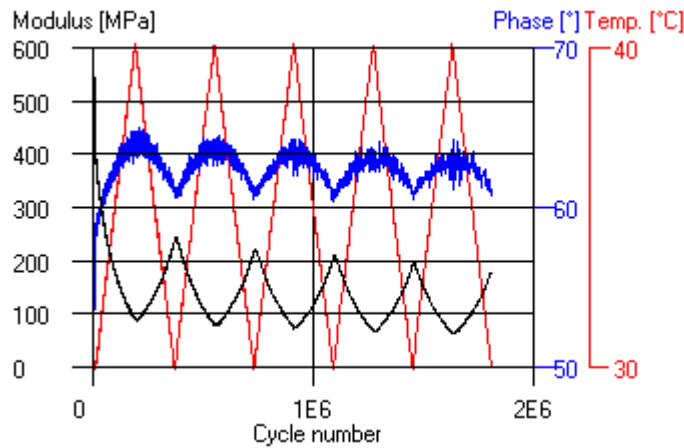


Abbildung 14: Entwicklung des Moduls, der Phasenverschiebung und der Temperatur als Funktion der Zyklenzahl. Gyrationprüfkörper mit Mineralstoff B, unter Wasser geprüft.

Die entsprechenden Blackdiagramme sind in Abbildungen 15 und 16 gezeigt. Der Einfluss des Wassers ist deutlich erkennbar.

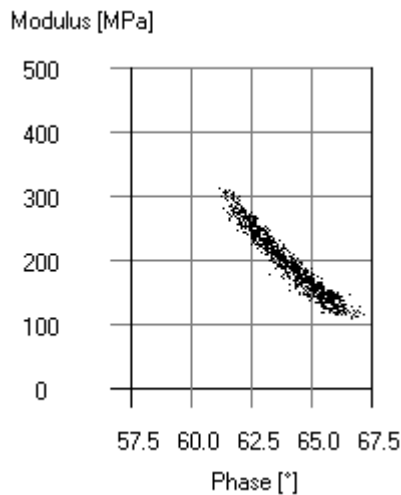


Abbildung 15: lineares Black-Diagramm, Rampen fallender Temperatur, an der Luft geprüft. Gyratorprüfkörper mit Mineralstoff B

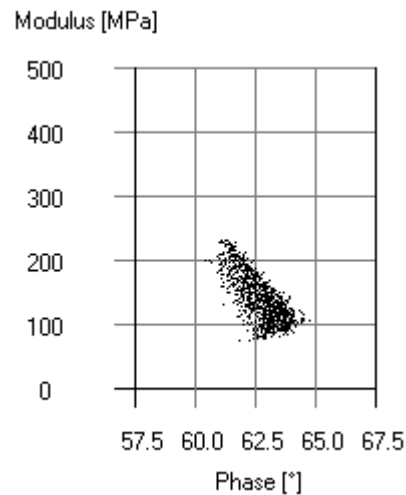


Abbildung 16: lineares Black-Diagramm, Rampen fallender Temperatur, unter Wasser geprüft. Gyratorprüfkörper mit Mineralstoff B

Die folgenden Abbildungen (17 und 18) zeigen (die Punkteschar nun durch die Regressionsgeraden ersetzt), dass die Rampen steigender und fallender Temperaturen sich praktisch nur in der ersten Rampe unterscheiden, dort aber deutlich. Es ist das die bei andauernder Schwingbelastung generell feststellbare Veränderung des Prüfkörpers zu Beginn, bei der Ermüdungsprüfung ist das die Phase 1. Die beiden Typen von Rampen zeigen somit die gleiche Langzeitentwicklung auf, nur erschwert der Sonderfall der ersten Rampe (mit steigender Temperatur), die Auswertung. Diese stützt sich deshalb auf die Rampen fallender Temperatur. Es sind jeweils die Regressionsgeraden der Zyklen 1, 3 und 5 markiert. Diejenigen der Zyklen 2 und 4 liegen entweder dazwischen, oder es decken sich die Rampen innerhalb der Bestimmungsgenauigkeit.

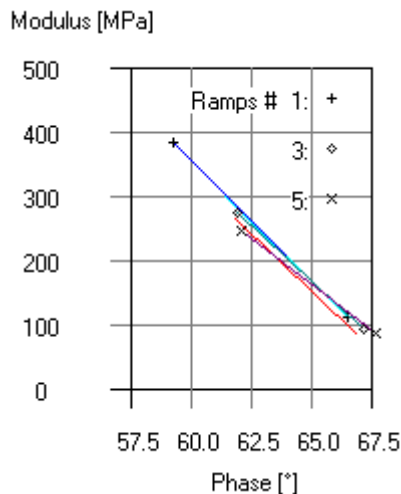


Abbildung 17: Modul vs. Phasenverschiebung, 'steigend', geprüft an der Luft. Gyratorprüfkörper mit Mineralstoff B

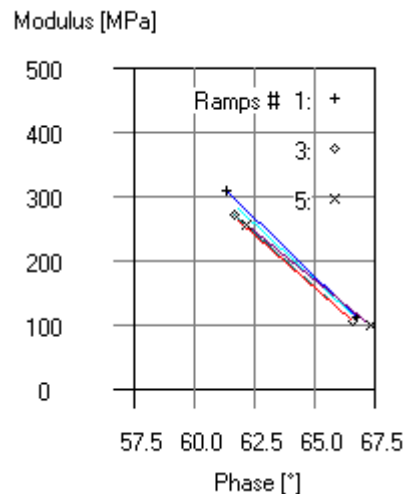


Abbildung 18: Modul vs. Phasenverschiebung, 'fallend', geprüft an der Luft. Gyratorprüfkörper mit Mineralstoff B

Dasselbe gilt für die Prüfung unter Einwirkung von Wasser (Abbildungen 19 und 20):

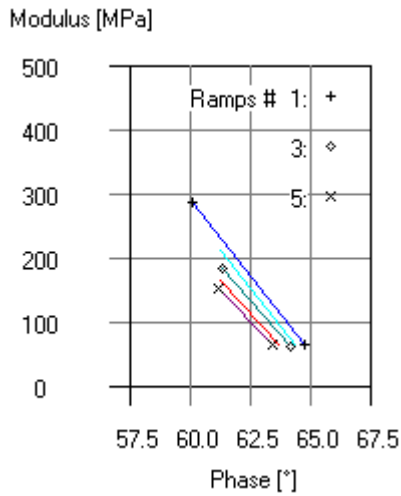


Abbildung 19: Modul vs. Phasenverschiebung, 'steigend', geprüft unter Wasser. Gyrtorprüfkörper mit Mineralstoff B

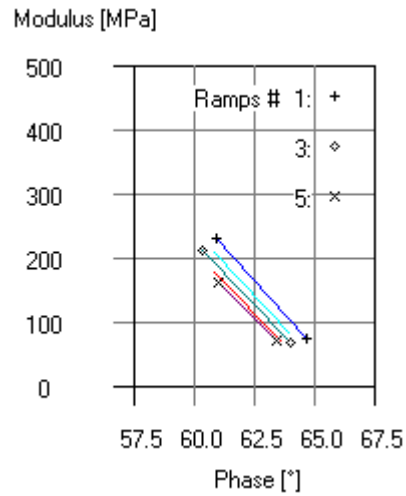


Abbildung 20: Modul vs. Phasenverschiebung, 'fallend', geprüft unter Wasser. Gyrtorprüfkörper mit Mineralstoff B

Das Material mit Mineralstoff A zeigt ein ähnliches Ergebnis, nur sind die Abstände zwischen den Geraden deutlich grösser (Abbildungen 21 und 22). Wiederum liegt bei der ersten Rampe mit steigender Temperatur ein atypisches Verhalten vor.

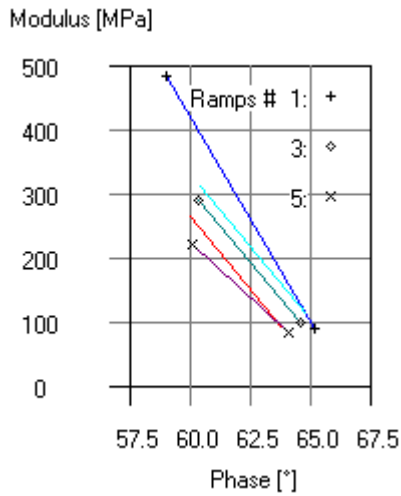


Abbildung 21: Modul vs. Phasenverschiebung, 'steigend', geprüft unter Wasser. Gyrtorprüfkörper mit Mineralstoff A

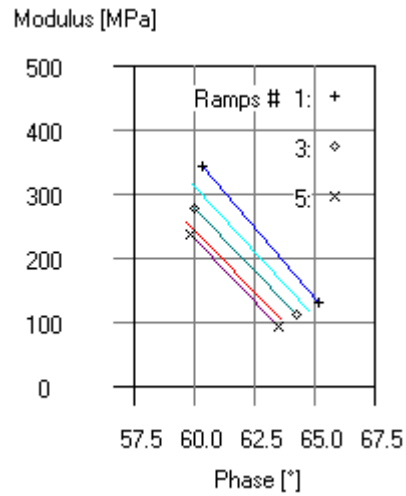


Abbildung 22: Modul vs. Phasenverschiebung, 'fallend', geprüft unter Wasser. Gyrtorprüfkörper mit Mineralstoff A

Abbildungen 23 und 24 zeigen die Entwicklung der Rampenmodule als Funktion der Temperaturzyklen.

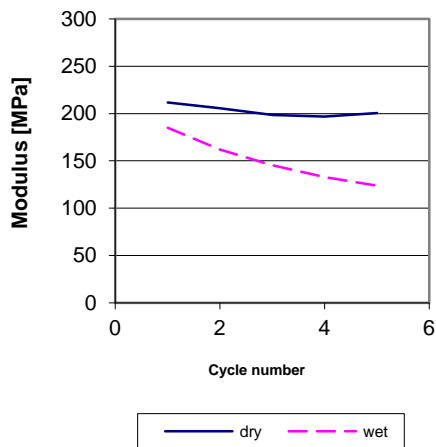


Abbildung 23: Rampenmodul als Funktion der Zyklenzahl für Gyratorprüfkörper mit Mineralstoff B

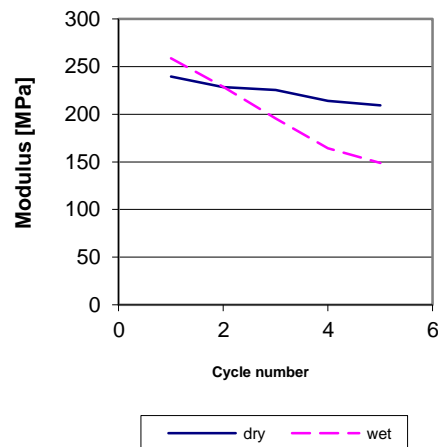


Abbildung 24: Rampenmodul als Funktion der Zyklenzahl für Gyratorprüfkörper mit Mineralstoff A

Tabelle 46 zeigt im Detail die Berechnung der Abnahme des Rampenmoduls. Sie wird für die Zyklen 2 bis 5 im Vergleich mit dem vorangehenden Zyklus berechnet.

Die Abbildungen 23 und 24 zeigen ein nichtlineares Verhalten. Die Differenzen zwischen den Modulwerten zweier aufeinanderfolgenden Zyklen sind zu Beginn meist grösser und nehmen gegen Ende ab. Zugleich treten Streuungen auf. Es wurde deshalb eine exponentielle Abnahme des Rampenmoduls angenommen, was bedeutet, dass der Rampenmodul von einem Zyklus zum andern um einen charakteristischen Prozentsatz abnimmt. Um den Einfluss der Streuungen zu reduzieren, wurde der Mittelwert dieser prozentualen Abnahmen als Kenngrösse gewählt. Die Tabelle 46 zeigt ein Beispiel für die Ermittlung dieser Kenngrösse.

Die weiteren Ergebnisse sind in den Tabellen 47 – 50 aufgeführt.

Tabelle 46: Entwicklung des Rampenmoduls für einen Prüfkörper mit Mineralstoff B, Prüfung an der Luft

Zyklus	Rampe fallender Temperatur	
	Rampenmodul	Abnahme des Rampenmoduls pro Zyklus
	[MPa]	[Modul-%]
1	202.2	
2	189.4	6.33
3	179.1	5.45
4	179.5	-0.24
5	167.2	6.83
Mittel		4.59

Tabelle 47: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit CAST W_C an Prüfkörpern mit Mineralstoff B

Prüfbedingungen	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwert
	[Modul-%]	[Modul-%]	[Modul-%]
an der Luft	4.59	3.77	4.16
unter Wasser	6.09	--	6.09
Wasserempfindlichkeit CAST W_C			1.93

Fazit: Die beiden Werte an der Luft liegen knapp ein Prozent auseinander, der Vergleich zwischen Luft und Wasser beträgt rund das Doppelte. Der Einfluss von Wasser ist bei diesen Mineralstoffen moderat.

Tabelle 48: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit CAST W_C an Prüfkörpern mit Mineralstoff A

Prüfbedingungen	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwert
	[Modul-%]	[Modul-%]	[Modul-%]
an der Luft	2.99	4.63	3.81
unter Wasser	8.19	7.93	8.08
Wasserempfindlichkeit CAST W_C			4.37

Fazit: Die Unterschiede bei den Wiederholungen liegen im gleichen Bereich wie bei den Gyratorprüfkörpern mit Mineralstoff B. Der Einfluss von Wasser ist aber wesentlich grösser, die Wasserempfindlichkeit CAST dieser Prüfkörper mit Mineralstoff A beträgt mehr als das Doppelte als bei Prüfkörpern mit Mineralstoff B.

Tabelle 49: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit CAST W_C an Prüfkörpern mit Mineralstoff M

Prüfbedingungen	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwert
	[Modul-%]	[Modul-%]	[Modul-%]
an der Luft	4.75	4.74	4.74
unter Wasser	5.05	--	5.05
Wasserempfindlichkeit CAST W_C			0.31

Bei Prüfkörpern, hergestellt aus einer Mischung der Mineralstoffe A und B, wurde eine überraschend tiefe Wasserempfindlichkeit CAST festgestellt. Allerdings kann eine überdurchschnittlich hohe Schadensrate bei den Prüfungen an der Luft festgestellt werden, was möglicherweise das Resultat etwas verfälschte. Insgesamt scheint aber der Anteil des Mineralstoffs B bereits auszureichen, den negativen Effekt des Mineralstoffs A zu kompensieren.

Tabelle 50: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit CAST W_C an Prüfkörpern mit Mineralstoff C

Prüfbedingungen	Prüfkörper 1
	[%]
an der Luft	3.54
unter Wasser	6.01
Wasserempfindlichkeit CAST W_C	2.47

Die Prüfkörper mit alluvialen Mineralstoffen, einem Typus, der vereinzelt zu Ablösung Anlass gab, weist gegenüber Mineralstoff B eine moderat erhöhte Wasserempfindlichkeit CAST auf, schneidet aber deutlich besser als A ab.

Tabelle 51 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 51: Zusammenfassung der Bestimmungen der Wasserempfindlichkeit CAST Wc

Prüfbedingung	B	A	M	C
	[Modul-%]	[Modul-%]	[Modul-%]	[Modul-%]
an der Luft	4.16	3.81	4.74	3.54
unter Wasser	6.09	8.08	5.05	6.01
Wasserempfindlichkeit CAST WC	1.93	4.37	0.31	2.47

Fazit: Die Bestimmungen an der Luft liegen so nahe beieinander, dass eine im Wesentlichen vom Material unabhängige Modulabnahme angenommen werden kann. Die Standardabweichung der vier Werte beträgt 0.52 Modul-% was zu den Differenzen der Einzelbestimmungen passt.

5. Folgerungen, Empfehlungen

5.1 Vergleich der verschiedenen mechanischen Prüfverfahren, Ergebnisse

Die Tabelle 52 fasst die im Kapitel 4 erarbeiteten Folgerungen zur Eignung der verschiedenen Prüfverfahren. Darauf basierend erfolgt der Entscheid, ob das jeweilige Verfahren für die weitere Auswertung verwendet werden soll. Er ist in der letzten Spalte der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 52: Bewertung der Ergebnisse der mechanischen Prüfverfahren und ihre weitere Verwendung

Prüfverfahren	Materialien	Bewertung, Fazit	Verwendung
Spaltzugprüfung, Lagerung FT1	SMA	Es ist keine eindeutige Veränderung der mechanischen Eigenschaften festzustellen.	Wird nicht weiter ausgewertet.
Spaltzugprüfung, Lagerung WL2 und FT2	SMA, AC11	Es ist nur beim AC11 und nur wenn keine Frost-Tau-Wechsel folgen eine deutliche Veränderung der mechanischen Eigenschaften festzustellen.	Wird ausgewertet.
Spaltzugprüfung, Lagerung WL2 mit FT3 und FT4	F *)	Die Wasserlagerung WL3 führt zu einer deutlichen höheren Festigkeitsabnahme als die Wasserlagerung WL2. Das Haftmittel führt nur bei kombinierter Lagerung zu einer deutlich geringeren Festigkeitsabnahme	Wird ausgewertet.
Spaltzugprüfung, Lagerung WL3	A, B und M	Die sukzessive strengeren Lagerungsbedingungen führen unabhängig vom Mineralstoffgemisch zu einer Abnahme der Festigkeit.	Wird ausgewertet.
Spaltzugprüfung, Lagerung WL3 und FT4			
Wasserempfindlichkeit ITSR	A, B, M, L	Es konnte keine Abnahme der Festigkeit als Folge der Wasserlagerung festgestellt werden. Die Prüfung stimmt somit nicht mit den Tendenzen des Umhüllungsgrades überein.	Wird ausgewertet.
Druck-Schwellversuch, FT1	SMA	Es ist keine eindeutige Veränderung der mechanischen Eigenschaften festzustellen.	Wird nicht weiter ausgewertet.
Druck-Schwellversuch, WL2 und FT3	F *)	Die Ergebnisse sind kontrovers.	Wird nicht weiter ausgewertet.
Modulbestimmung im Spaltzugversuch WL1	A, B	Es kann kein systematischer Trend festgestellt werden.	Wird nicht weiter ausgewertet.
Modulbestimmung im Druck-Schwellversuch WL1	A, C, M	Die Wasserlagerung führt zu einer mässigen Abnahme der Festigkeit.	Wird ausgewertet.
Entwicklung des Moduls CAST während Wasserlagerung	A, B	Das Mineral A zeigt eine stärkere Abnahme der Steifigkeit, bei beiden tritt aber die Abnahme rasch ein, zum Teil vor der ersten mechanischen Belastung. Die Unterschiede sind aber gering, die Prüfung eignet sich also wenig, um die Wasserempfindlichkeit festzustellen.	Wird nicht weiter ausgewertet.
Wasserempfindlichkeit CAST	A, B, C, M	Die Bestimmungen an der Luft liegen so nahe beieinander, dass eine im Wesentlichen vom Material unabhängige Modulabnahme angenommen werden kann. Die Standardabweichung der vier Werte beträgt 0.52 Modul-%, was zu den Differenzen der Einzelbestimmungen passt.	Wird ausgewertet.

*) Je eine Mischung mit und ohne Haftmittel

Die Tabelle 53 fasst die Eignung der Prüfverfahren aufgrund der Ergebnisse zusammen. Gezeigt werden dabei

- Prüfverfahren.
- Materialien, das heisst die Mineralstoffe, die für die Prüfkörperherstellung eingesetzt wurden, an denen vergleichbare Reihen von Ergebnissen vorliegen. Vereinzelt Bestimmungen im Rahmen von Vorversuchen werden nicht berücksichtigt.
- Mittelwert: Zuerst wurden die Mittelwerte der Ergebnisse pro Material berechnet. Das Mittel dieser Werte über die berücksichtigten Materialien gilt als gesamter Mittelwert. Die Berechnung stützt sich auf die Ergebnisse im Kapitel 4. Er gibt die Lage an, um die die Ergebnisse sich gruppieren.
- Spreizung: Die maximale Abweichung eines Mittelwertes vom Durchschnitt aller, also vom gesamten Mittelwert. Je höher die Spreizung im Vergleich zum gesamten Mittelwert ist, umso eher können mit dem Prüfverfahren wasserempfindliche Mischgute erkannt werden. Es wird deshalb in der Tabelle sowohl der Absolutwert der Spreizung als auch die relative Spreizung angegeben.
- Differenzierung: Falls die Streuung abschätzbar ist, wird die Differenzierung als absolute Spreizung dividiert durch die Streuung angegeben. Ein hoher Wert bedeutet, dass ein erkannter Unterschied auch signifikant ist.

Tabelle 53: Auswertung ausgewählter Prüfergebnisse auf Signifikanz

Prüfverfahren	Materialien	gesamter Mittelwert	Spreizung	Streuung	Differenzierung
A: Spaltzugprüfung, Lagerung WL2 und FT2	AC11 SMA	88 [%]	3.9 [%]	4.5 [%]	0.9
B: Spaltzugprüfung, Lagerung WL2 mit FT3	F *)	81 [%]	16.6 [%]	4.5 [%]	3.7
C: Spaltzugprüfung, Lagerung WL3	A, B, M	58 [%]	12.1 [%]	4.5 [%]	2.7
D: Spaltzugprüfung, Lagerung WL3 und FT4	A, B, M	30 [%]	1.7 [%]	4.5 [%]	0.4
E: Wasserempfindlichkeit ITSR	A, B, L, M	107.5 [%]	16.4 [%]	11.1 [%]	1.48
F: Modulbestimmung im Druck-Schwellversuch WL1	A, C, M	10 [%]	4.1 [%]	14.3 [%]	0.3
G: Wasserempfindlichkeit CAST	A, B, C, M	5.2 [%/Zyklus]	4.06 [%/Zyklus]	0.7 [%/Zyklus]	5.9

*) mit und ohne Haftmittel

Wegen der jeweils eher geringen Zahl von Untersuchungen eignen sich die in Tabelle 53 zusammengefassten Ergebnisse nur für eine grobe Klassierung. Doch sind zumindest, abgesehen vom ITSR, zwei Gruppen von Prüfungen zu erkennen: Die einen differenzieren gut, die andern nicht. Als grobe Klassierung wird deshalb die Schranke von 2 für die Differenzierung vorgeschlagen.

Es lohnt sich im übrigen, die oben mit A bis D bezeichneten Prüfungen als Gruppe verwandter Verfahren zu betrachten, bei denen die Lagerungsbedingungen sukzessive verschärft wurden. Es zeigt sich dabei, dass A (geringste Beanspruchung) schlecht, B und C (zunehmende Beanspruchung) wesentlich besser und D (extreme Beanspruchung) wieder schlecht abschneiden. Die Forschungsstellen interpretieren das so, dass im Fall A die Beanspruchung zu einer nur sehr geringen Schwächung des Verbundes führte, demgemäss überwiegt die Messungenauigkeit den Effekt der Lagerung. In den Fällen B und C sind die Schwächungen abhängig von den Mischguteigenschaften mehr oder weniger deutlich, somit ist eine Differenzierung gegeben. Im Fall D hingegen hat eine weitgehende Zerstörung stattgefunden, also ist auch die Differenzierung gering.

5.2 Vergleich der verschiedenen mechanischen Prüfverfahren, Verfahrenvergleich

Die Tabelle 54 stellt die angewendeten Verfahren einander gegenüber. Gezeigt werden dabei Aufwand und Aussagekraft textlich

Tabelle 54: Bewertung ausgewählter Verfahren.

Prüfverfahren	Aufwand	Aus-sagekraft
Spaltzugprüfung	Diese Prüfung ist einfach und kann in jedem Strassenbaulabor mit einer Marshallpresse durchgeführt werden.	nur Prüfungsteil
Spaltzugprüfung dynamisch	Diese Prüfung erfordert eine servohydraulische Prüfmaschine und entsprechendes Know-How.	nur Prüfungsteil
Wasserlagerung und Sättigung unter Vakuum (WL2 und WL3)	Die Wasserlagerungen können einfach durchgeführt werden; die erforderlichen Gerätschaften sollten in jedem Strassenbaulabor vorhanden sein, da sie auch für andere Prüfungen verwendet werden.	nur Prüfungsteil
Frost-Tau-Wechsel FTn50 (FT2 und FT3)	Diese Beanspruchung ist aufwendig und benötigt entsprechende Bäder, welche in spezialisierten Betonlabors vorhanden sind. Die Bäder werden für die Prüfung der Frost-Tau-Salz-Beständigkeit von Beton gem einer im Zementbulletin 86 publizierten Prüfanleitung verwendet. In der Schweiz führen wenige Betonlabors diese Prüfung durch.	nur Prüfungsteil
Frost-Tau-Wechsel N50 (FT4)	Diese Beanspruchung ist aufwendig und benötigt eine Klimakammer, mit welcher sowohl die Temperaturzyklen programmiert, als auch Bäder in der Kammer automatisch geflutet und entleert werden können.	nur Prüfungsteil
Spaltzugprüfung mit Lagerung WL2 und FT2	wegen der Lagerungsart FT2 anspruchsvoll	unzureichend
Spaltzugprüfung, Lagerung WL2 mit FT3	wegen der Lagerungsart FT3 anspruchsvoll	zureichend
Spaltzugprüfung, Lagerung WL3	Das Verfahren ist einfach.	zureichend
Spaltzugprüfung, Lagerung WL3 und FT4	Wegen der Lagerungsart FT4 anspruchsvoll	unzureichend
Wasserempfindlichkeit ITSR	Diese Normprüfung kann einfach und mit geringem Aufwand durchgeführt werden.	unzureichend
Modulbestimmung im Druckschwellversuch WL1	Diese Prüfung bedingt einen anspruchsvollen Versuchsaufbau und eine hochentwickelte Auswertesoftware, die Modulbestimmung aufgrund der Verformung unter den Pulsen erlaubt.	unzureichend
Wasserempfindlichkeit CAST	Diese Prüfung dauert fünf Tage und bedingt einen anspruchsvollen Versuchsaufbau mit der Möglichkeit, Temperaturregler zu fahren. Eine hochentwickelte Auswertesoftware zur Erfassung der Entwicklung der Steifigkeit ist erforderlich.	zureichend

5.3 Vergleich der Ergebnisse mechanischer Prüfverfahren mit dem Umhüllungsgrad

Der Vergleich basiert auf den Verfahren mit positiver Bewertung gemäss Tabellen 53 und 54. Die Daten sind in Tabelle 55 zusammengestellt.

Tabelle 55: Vergleich der mechanischen Prüfungen und UmhüllungsgradVerfahren

Material	Umhüllungsgrad [%]	B: Spaltzugprüfung, Lagerung WL2 mit FT3 Spaltzugfestigkeit [N/mm ²] [%]	C: Spaltzugprüfung, Lagerung WL3 [%]	G: Wasserempfindlichkeit CAST [%]
A	31	nb	56	4.4
B	79	nb	47	1.9
C	fehlt	nb	nb	2.5
F ohne HM	34	64	41	nb
F mit HM	95	97	89	nb
M	55 (berechnet)	nb	70	0.3
Verfahren einfach?	Ja	Nein	Ja	Nein

Beim Verfahren B korrelieren die Ergebnisse gut mit denen des Umhüllungsgrades. Doch liegen hier zu wenige Werte für eine abschliessende Beurteilung vor. Auch ist das Verfahren als aufwendig zu bewerten.

Beim Verfahren C fällt auf, dass der bei der Umhüllungsprüfung schlecht abschneidende Mineralstoff A relativ gut abschneidet, während beim Mineralstoff B gerade das umgekehrte Verhältnis vorliegt und die Mischung von A und B sich besser als die Komponenten verhält. Sehr gut funktioniert das Verfahren C, jedoch beim Mineralstoff F mit und ohne Haftmittel.

Beim Verfahren G fällt, ähnlich wie beim Verfahren C, auf, dass die Mischung M sehr gut abschneidet. Die Forschungsstellen interpretieren das dahingehend, dass in einer Mischung mit einem gut und schlecht umhüllenden Mineralstoffanteil der gute kompensierend wirken kann. Die überraschend hohe verbleibende Festigkeit im Verfahren C und der geringe Festigkeitsabfall pro Zyklus im Verfahren G sind wohl teilweise diesem Effekt zuzuordnen.

5.4 Bewertung des Umhüllungsgrades aufgrund mechanischer Prüfverfahren

Selbst nach Ausschluss der Prüfungen, die kaum oder wenig differenzieren, erweist sich die Korrelation zwischen Umhüllungsgrad und mechanischen Eigenschaften als mässig. In allen Verfahren gibt es zwar eine grob übereinstimmende Grundtendenz, doch bei den Serien, bei denen mehrere Werte vorliegen, liegen einzelne Werte auch quer. Generell nimmt die mechanische Festigkeit weniger ausgeprägt ab, als der Umhüllungsgrad. Vom Umhüllungsgrad kann also somit gesagt werden, dass er das Problem überzeichnet. Zu hohe Anforderungswerte an den Umhüllungsgrad können somit durchaus brauchbare Mineralstoffe ausschliessen.

5.5 Empfehlungen

Die verwendeten Verfahren decken unterschiedliche Kombinationen der Einwirkung von Wasser und mechanischer Belastung auf Asphaltprüfkörper ab. Für einen Teil dieser Kombinationen zeigte sich eine Tendenz zur Schädigung des verdichteten Mischgutes im Fall von Mineralstoffen mit einem geringen Umhüllungsgrades, die aber nicht so gravierend ist, dass sie eine Verschärfung des Umhüllungsgrades rechtfertigt.

Die in der Schweiz übliche Normanforderung eines Umhüllungsgrades von 80% kann somit beibehalten werden und sollte auf keinen Fall verschärft werden.

Das gilt sowohl für Bindemittel, die mit einer vorgeschriebenen Zusammensetzung von Splitten geprüft werden, als auch für die Prüfung einer für ein Mischgut spezifischen Kombination von Bindemitteln und Mineralstoffen.

Für praktische Zwecke empfiehlt sich das Verfahren C, Wasserlagerung 72 h bei 60°C gefolgt von Spaltzugversuch. Es hat gemäss der Ergebnisse dieser Forschung das Potenzial, den ITSR abzulösen, da dieser eindeutig zu wenig differenziert.

Für vertiefte wissenschaftliche Untersuchungen empfiehlt sich das Verfahren G, die Wasserempfindlichkeit mit dem CAST.

Die Forschungsstellen empfehlen, das Verfahren C zusammen mit dem Umhüllungsgrad und dem normierten Verfahren ITSR mit einer breiten und auf die Praxis abgestützten Auswahl von Mineralstoffen, kombiniert mit wenigen typischen Bindemitteln, systematisch zu untersuchen. Erst Ergebnisse einer solchen Forschung können die Grundlage zur Einführung einer neuen Prüfnorm basierend auf dem Verfahren C und der Festlegung neuer Anforderungswerte bilden.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AC	Asphalt concrete, verwendetes Mischgut.
CAST	Coaxial Shear Test (koaxialer Schubtest), Empa Prüfmethode, besonders geeignet zum Bestimmen des mechanischen Verhaltens unter verschiedenen Bedingungen.
CAST Wc	Wasserempfindlichkeit mit CAST: Spezielles Prüfverfahren, mit dem die Auswirkungen mechanischer Dauerbelastung kombiniert mit Temperaturrampen und Wassereinfluss bestimmt werden kann. Der Prüfaufbau basiert auf dem CAST.
DSV	Druckschwellversuch
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio, Vergleichswert aus Basis des Spaltzugversuchs.
D _L	durchschnittliche Abnahme in Luft.
D _w	durchschnittliche Abnahme in Wasser.
FT	Frosttauwechsel, FT1, FT2, FT3, FT4 als angewandte Prüfbedingungen.
FTN50	Normierte Basis der Varianten FT1, FT2 und FT3.
n.b.	Nicht bestimmt.
N50	Normierte Basis der Variante FT4.
PK	Prüfkörper
SMA	Splittmastix Asphalt.
SPV	Spaltzugversuch.
Stabw.	Standardabweichung.
WL	Wasserlagerung
---	Keine Angabe.

Literaturverzeichnis

[SCHM 71]	Schmidt, J.; Schniering, A.; "Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel auf Mineralstoffen bei hydrodynamischer Beanspruchung und deren Prüfung mit Ultraschall in Tausalzlösungen", 1971, 5300 Bonn-Bad Godesberg
[JUN 87]	Junker, J.P. „Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt“, EMPA report no. 215, 1987
[REH 95]	Rehmann, G.; Gubler, R.; "Haftvermögen bituminöser Bindemittel an Mineralstoffen", 1995, Bundesamt für Strassenbau, Nr. 347
[STU 90]	Stuart, K.D., Moisture Damage in Asphalt Mixtures- A State of the Art Report. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-90-019, 1990
[HICKS 91]	Hicks, R. G. NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: "Moisture Damage in Asphalt Concrete." TRB, National Research Council, Washington DC, 1991
[HAB 94]	Habermann, J. A. "Design Features and a Preliminary Study of Purdue Linear Compactor and the PURWheel Tracking Device" M.S. thesis, Prudue University, West Lafayette, Indiana, 1994
[ASCH 95]	Aschenbrenner, T.; McGennis, R.B.; Terrel, R.L.; "Comparison of several Moisture Susceptibility Test to Pavement of known Field Performance", AAPT Journal, Vol. 64, p 163-208, 1995
[YOU 97]	Younger, K.D., Partl, M.N., Fritz H.W., Gubler, R., „Asphalt concrete shear testing with the co-axial shear tester at EMPA“, Mechanical tests for bituminous materials, DiBenedetto & Franken (eds) 1997 RILEM.
[CHAN 98]	Changlin P., White D. W., "Evaluation of Stripping for Asphalt Concrete Mixtures Using Accelerated Testing Methods", TRB 1630, Washington, 1998
[ALAM 98]	Alam M. M., Tandon v., Nazarian S., Tahmoressi M., "Identification of Moisture-Susceptible Asphalt Concrete Mixes Using Modified Environmental Conditioning System", TRB 1630, Washington, 1998
[RAAB 03]	Raab, C., Partl, M. N., Anderegg, P., Brönnimann, R. „Two Years Experience with a New Long-Term Pavement Performance Monitoring Station on a Swiss Motorway“. Proceedings of 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, 7th-10th July, Minho University, Guimarães, Portugal, pp263-271, 2003
[SOKOLOV 06]	Sokolov, K., Gubler, R., Partl, M. N., „Extended Numerical Modeling and Application of the Coaxial Shear Test for Asphalt Pavements“. J. of Materials & Structures Nr. 279, June, pp 515-522, 2005
[GUBLER 05]	Gubler, R., Partl, M. N., Canestrari, F., Grilli, A. „Influence of Water and Temperature on Mechanical Properties of selected Asphalt Pavements“. J. of Materials & Structures Nr. 279, June, pp 523-532, 2005
[SN 640'431]	"Asphaltbeton, Konzeption, Anforderung, Ausführung"
[SN 640'452c]	"Heissmischfundationsschichten HMF, Anforderungen, Ausführung"
[SN 640 925]	„Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) Zustandserhebung und Indexbewertung“
[SN 670'460]	„Bituminöses Mischgut – Prüfvorschriften – Haftvermögen von bituminösen Bindemitteln an Mineralstoffen"
[SN 670'546]	„Bituminöse Bindemittel Bestimmung der Duktilität“

[SN 671'969]	„Bituminöses Mischgut, Marshall-Versuch“ (nicht mehr in Kraft)
[EN 933-1]	„Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren“
[EN 1426]	„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration“
[EN 1427]	„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren“
[EN 12539]	„Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) Zustandserhebung und Indexbewertung“
[EN 12592]	„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Löslichkeit
[EN 12697-1]	„Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt“
[EN 12697-5]	„Asphalt — Prüfverfahren für Heissasphalt — Teil 5: Bestimmung der Rohdichte“
[EN 12697-11]	„Asphalt — Prüfverfahren für Heissasphalt — Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen“
[EN 12697-12]	„Asphalt — Prüfverfahren für Heissasphalt — Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern“
[EN 12697-23]	„Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern“
[EN 12697-26]	„Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 26: Steifigkeit“
[EN 12697-30]	„Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät“
[EN 12697-31]	„Asphalt — Prüfverfahren für Heissasphalt — Teil 31: Herstellung von Probekörpern, Gyrator-Verdichter“
[EN 13702-2]	„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der dynamischen Viskosität von modifizierten Bitumen - Teil 2: Koaxial-Zylinder-Verfahren“

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Strassen, Brücken, Tunnel

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 7.12.2011 / 18.2.2012

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS1999/128
Projekttitle: Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut, Grundlagen für eine Anforderungsnorm
Enddatum: April 2012

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Zwischen der Prüfmethode „Ermitteln der Affinität zwischen Bindemittel und Mineralstoffen mittels Bestimmen des Umhüllungsgrades an einem Testmischgut“ und mechanischen Prüfmethode konnte beim Einsatz sehr unterschiedlicher mechanischer Prüfverfahren entweder keine oder eine nur mässig ausgeprägte Beziehung festgestellt werden.

Durch Analyse der Ergebnisse der mechanischen Prüfverfahren und dem Vergleich mit dem Umhüllungsgrad konnten zwei erfolgversprechende mechanische Prüfverfahren als möglicher Ersatz für den Umhüllungsgrad ermittelt werden, wobei eines (Herstellung von Prüfkörpern nach Norm, Wasserlagerung bei erhöhter Temperatur und Bewerten der verbleibenden Stabilität mittels der Spaltzugfestigkeit) mit der Standardausrüstung von Strassenbaulabors bei vertretbarem Aufwand durchzuführen ist, während das zweite (Bestimmen der Wasserempfindlichkeit mit koaxialem Schubtest) nur von spezialisierten Forschungslabors durchgeführt werden kann und somit für die Abklärung spezifischer Fragestellungen und für vertiefte Untersuchungen eignet.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielreichung:

Das Ziel, das Prüfverfahren für die Bestimmung des Umhüllungsgrades zu validieren wurde erreicht. Es zeigte sich, dass der Einfluss dieses Kennwertes auf die mechanischen Eigenschaften des Mischgutes relativ gering ist. Es konnten aus den Ergebnissen die entsprechenden Empfehlungen bezüglich der Anforderungen an den Umhüllungsgrad ausgearbeitet werden.

Das Ergebnis im Rahmen des FA ein mechanisches Prüfverfahren zu entwickeln und oder zu evaluieren wurde erreicht. Es wird ein Prüfverfahren vorgeschlagen, das bekannte Teile zu einem neuen zusammenfasst.

Es konnten aber nicht genug Daten ermittelt werden, um eine Anforderungen für dieses mechanische Prüfverfahren vorzuschlagen.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Forschungsarbeit und die bisherigen Erfahrungen aus der Praxis legen nahe, die Anforderungen an den Umhüllungsgrad beim bisherigen Wert von 80% zu belassen.

Die als optimal bewertete Prüfmethode, Herstellung von Prüfkörpern nach Norm, Wasserlagerung bei erhöhter Temperatur und Bewerten der verbleibenden Stabilität mittels der Spaltzugfestigkeit, ist in einem neuen Forschungsauftrag vertieft zu untersuchen. Ziel muss dabei sein, die in diesem Forschungsauftrag entwickelte Methode auf eine breite Palette von Mischgütern anzuwenden. Die Untersuchungen sind dabei unter Vergleichsbedingungen in mindestens drei Laboratorien durchzuführen, damit nicht nur eine Datenbasis für Anforderungswerte erhalten wird, sondern auch Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit abgeschätzt werden können.

Publikationen:

Aufgrund der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit wurden bisher keine Publikationen veröffentlicht.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Raab

Vorname: Christiane

Ami, Firma, Institut: Empa, Dübendorf

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Strassen, Brücken, Tunnel

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die erwarteten Zielsetzungen sind erreicht, allerdings musste aber der Forschungsansatz geändert und erweitert werden. Die Begleitkommission wurde darüber im Verlaufe der Forschungsarbeit informiert.

Die Termine wurden insbesondere wegen der notwendigen Umstellung des Forschungskonzeptes nicht eingehalten.

Umsetzung:

Die geltenden Anforderungen an den Umhüllungsgrad können beibehalten werden und sind nicht zu erhöhen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die BK bewertet den Vorschlag der Forschungsstelle für eine weiterführende Forschung positiv.

Einfluss auf Normenwerk:

Da der Umhüllungsgrad zwar von vielen Bauherren gefordert wird, aber nicht normiert ist, ergibt sich kein direkter Einfluss auf die Normierung. Das vorgeschlagene neue Prüfverfahren kann wohl nach weiteren Forschungen ins Normenwerk eingegliedert werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: **ARN**

Vorname: **THOMAS**

Amt, Firma, Institut: **FK 5**

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärm mindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011

1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'aggressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011

1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways</i>	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée</i>	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice</i>	2011
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Activity oriented analysis of induced travel demand</i> <i>Analyse orientée aux activités du trafic induit</i>	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung <i>Approches innovantes de la gestion du stationnement</i> <i>Innovative approaches to parking management</i>	2012

1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012
------	--------------	--	------

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data.

In the second section, the author outlines the various methods used to collect and analyze the data. This includes both primary and secondary data collection techniques. The analysis focuses on identifying trends and patterns over time.

The third section provides a detailed breakdown of the results. It shows that there has been a significant increase in sales volume over the period studied. This is attributed to several factors, including improved marketing strategies and a growing customer base.

Finally, the document concludes with a series of recommendations for future actions. It suggests that the company should continue to invest in research and development to stay ahead of the competition. Additionally, it recommends regular audits to ensure the ongoing accuracy of the financial records.