



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

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

# **Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen**

**Stability of polymers in road pavements containing  
polymer bitumen in the construction step**

**Empa Dübendorf  
Dr. Martin Hugener**

**IMP Bautest AG  
Dr. Christian Angst**

**Forschungsauftrag VSS 2001/452 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**Juni 2013**

**1419**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

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

# **Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen**

**Stability of polymers in road pavements containing  
polymer bitumen in the construction step**

**Empa Dübendorf  
Dr. Martin Hugener**

**IMP Bautest AG  
Dr. Christian Angst**

**Forschungsauftrag VSS 2001/452 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**Juni 2013**

**1419**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Dr. Martin Hugener

### Mitglieder

Dr. Christian Angst

## Federführende Fachkommission

Fachkommission 4: Baustoffe

## Begleitkommission

### Präsident

Marinus van den Berg

### Mitglieder

Urs Schellenberg

Blaise Graf

Ingo Nösler

## Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

## Bezugsquelle

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>8</b>
<b>Summary</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>11</b>
1.1 Ausgangslage.....	11
1.2 Stand der Forschung.....	12
1.3 Auftrag und Forschungsziele .....	14
<b>2 Materialien</b> .....	<b>15</b>
2.1 Charakterisierung der Gesteinskörnungen .....	15
2.2 Charakterisierung der Bindemittel.....	15
<b>3 Methodik</b> .....	<b>16</b>
3.1 Wahl des Belagtyps .....	16
3.2 Wahl der Prüfmethode n .....	17
3.3 Beschreibung der Prüfmethode n .....	17
3.3.1 Ko-axialer Schubtest (KAST) .....	17
3.3.2 Vierpunktbiegung .....	18
3.3.3 Druckschwellversuch und dynamische Eindringtiefe .....	19
3.3.4 Gelpermeationschromatographie (GPC) .....	20
<b>4 Experimenteller Teil</b> .....	<b>21</b>
4.1 Vorversuche mit Gussasphalt (Serie MA).....	21
4.1.1 Mischrezept MA1 .....	21
4.1.2 Gussasphaltherstellung und Alterung .....	22
4.1.3 Eigenschaften bei tiefen Temperaturen (Komplexer Modul mittels KAST-Versuch) .....	23
4.1.4 Eigenschaften bei hohen Temperaturen (Dynamische Eindringtiefe ET-dyn).....	24
4.1.5 Untersuchung der Gussasphaltherstellung.....	25
4.1.6 Untersuchung des Polymerabbaus mittels GPC.....	26
4.2 Vorversuche 1 mit Asphaltbeton (Serie ACP).....	27
4.2.1 Prüfkörperherstellung .....	28
4.2.2 Indirekter Zugversuch ITT an Gyrator-Prüfkörpern.....	30
4.2.3 Indirekter Zugversuch ITT mit Marshallprüfkörpern .....	31
4.2.4 Druckschwellversuch (DSV).....	31
4.3 Vorversuche 2 mit Asphaltbeton (Serie ACW).....	33
4.3.1 Gyratorverdichtung.....	33
4.3.2 Indirekter Zugversuch ITT (Spaltzug) .....	35
4.3.3 Druckschwellversuch DSV .....	36
4.3.4 Schlussfolgerungen zu den Prüfmethode n .....	36
4.4 Hauptversuch mit Asphaltbeton (Serie ACX).....	37
4.4.1 Mischgutherstellung .....	37
4.4.2 Prüfmethode n.....	37
4.4.3 Marshallprüfung .....	38
4.4.4 Gyratorverdichtung.....	39
4.4.5 Bindemittleigenschaften .....	40

4.4.6	Indirekter Zugversuch (ITT) .....	41
4.4.7	Druckschwellversuch .....	42
4.4.8	Ermüdungsprüfung mittels 4-Punkt-Biegung .....	43
<b>5</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>44</b>
5.1	Diskussion.....	44
5.2	Schlussfolgerungen .....	46
5.3	Weiterer Forschungsbedarf .....	46
	<b>Anhänge .....</b>	<b>48</b>
	<b>Abkürzungen.....</b>	<b>61</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>63</b>
	<b>Projektabschluss.....</b>	<b>66</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>69</b>

## Zusammenfassung

Bei Schadenfällen wird bei der Suche nach den Ursachen oft eine Überhitzung des Bindemittels in Betracht gezogen. Beim Einsatz von Polymerbitumen (PmB) werden die Resultate der Bindemittelanalysen in Frage gestellt, da nicht sicher ist, inwieweit sich die Eigenschaften des PmB durch die Extraktion verändern. Deshalb wäre ein Nachweis der Bindemittelschädigung bei PmB-haltigen Belägen wünschenswert, der direkt am verdichteten Mischgut, beispielsweise an Bohrkernen, durchgeführt werden kann. Doch auch bei einer tatsächlich nachgewiesenen Überhitzung stellt sich die Frage, wie gross dieser Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der bitumenhaltigen Schicht ist.

Diese Forschungsarbeit untersuchte die Frage, ob eine Überhitzung des Bindemittels ohne Extraktion des Bindemittels direkt an Bohrkernen des geschädigten Belags nachgewiesen werden kann. Dazu wurde Mischgut im Labor künstlich gealtert und daraus Prüfkörper hergestellt, die mit verschiedenen mechanischen Prüfmethode untersucht wurden. Um die unterschiedlichen Alterungsmechanismen zu studieren, war vorgesehen verschiedene Mischguttypen zu untersuchen: dichter Asphaltbeton, offenporiger Asphalt und Gussasphalt. Letzterer wurde ins Forschungsprogramm aufgenommen, obwohl der Anteil an Gussasphalt weniger als 10% der schweizerischen Asphalt-Produktion ausmacht, aber aufgrund der viel höheren Temperaturen speziell empfindlich auf eine thermische Schädigung des PmB's ist.

Die Resultate der Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verhärtung des Bindemittels durch Überhitzung bei der Herstellung nicht eindeutig an Bohrkernen nachgewiesen werden kann ohne das Bindemittel zu extrahieren, da sich verschiedene Einflussfaktoren auf die Mischguteigenschaften überlagern. So wurde beobachtet, dass beim Rühren des Labor-Gussasphaltes im Gussasphaltkocher durch Abrieb grössere Mengen an Feinanteilen entstehen, die zu einer übermässigen Versteigerung des Mörtels führen. Diese ist unabhängig von der Lagertemperatur und wird alleine durch die Kochzeit beeinflusst, was durch die Bestimmung des Fülleranteils nachgewiesen wurde. Beim Walzasphalt bewirkt eine erhöhte thermische Belastung zuerst eine Verhärtung des Bindemittels, was mit in einer erhöhten Marshallstabilität und höheren Werten beim Druckschwellversuch einhergeht. Eine weitere Verhärtung des Bindemittels beeinflusst jedoch auch die Verdichtbarkeit, die abnimmt, während der Hohlraumgehalt parallel dazu ansteigt. Dies führt schliesslich wieder zu einer Abnahme der Marshallstabilität, so dass Rückschlüsse daraus nicht eindeutig sind.

Aus diesen Gründen wurde das Forschungsprojekt abgebrochen, da weitere Prüfungen an zusätzlichen Mischguttypen keine anderen Resultate hervorgebracht hätten und es klar war, dass das Projektziel nicht erreicht werden kann. Die vorgesehenen Untersuchungen am offenporigem Asphalt wurden deshalb nicht durchgeführt.

Dieses Forschungsprojekt hat gezeigt, dass aus den mechanischen Eigenschaften einer Belagsschicht nicht auf eine Überhitzung geschlossen werden kann, auch wenn Sollwerte aus der Erstprüfung zum Vergleich vorhanden sind, da sich verschiedene gegenläufige Effekte überlagern.

## Résumé

D'ordinaire, les cas de détérioration des chaussées sont volontiers mis sur le compte d'une surchauffe du liant. Si le liant concerné est un bitume modifié par des polymères, les résultats d'analyse sont aussitôt remis en question car on sait peu de choses sur les transformations subies par le bitume-polymère pendant l'extraction. Une preuve de la dégradation du liant obtenue directement sur l'enrobé compacté (un essai sur une carotte, par exemple) apporterait du crédit en la matière. Enfin, au cas où une surchauffe était avérée, la question de son influence sur les propriétés mécaniques de la couche bitumineuse doit être posée.

Ce travail cherche à savoir si la surchauffe du liant pouvait être détectée sans passer par l'extraction mais directement grâce à des essais sur des carottes prélevées dans le périmètre détérioré. Au laboratoire, l'enrobé est d'abord vieilli, compacté, puis soumis à différents essais mécaniques. Pour rendre compte de la diversité des agents de vieillissement, différents types d'enrobé sont choisis: le béton bitumineux dense, l'enrobé drainant et l'asphalte coulé. Même si ce dernier produit ne représente que 10% de la production d'enrobé en Suisse, son incorporation dans le protocole d'étude est justifié par les très hautes températures de sa mise en œuvre : le risque de surchauffe du bitume-polymère est important.

Les essais n'ont pas apporté la preuve que le durcissement du liant à cause d'une surchauffe pouvait être détecté sur carottes sans extraction car trop de facteurs ayant de l'influence sur les propriétés de l'enrobé se superposent. Parmi eux, la formation de fines par attrition pendant le malaxage de l'asphalte coulé en laboratoire. En effet, l'analyse granulométrique des produits malaxés indique que la teneur en fines est indépendante de la température de conservation mais sensible à la durée de malaxage. Ces fines en excès entraînent une rigidification notable du mortier bitumineux. Concernant le béton bitumineux, le vieillissement thermique provoque d'abord un durcissement du liant qui se traduit par une augmentation de la stabilité Marshall et de la résistance aux déformations permanentes (essai de compression cyclique). Néanmoins, au-dessus d'un certain seuil, le durcissement se répercute sur l'aptitude au compactage : la compacité maximale diminue et le pourcentage de vides augmente en parallèle. Tandis que la stabilité Marshall baisse, il devient impossible de tirer des conclusions quant à la dégradation des polymères dans le liant.

Après avoir réalisé nombre d'essais avec l'asphalte coulé et le béton bitumineux, la poursuite du projet avec d'autres types d'enrobé, notamment des enrobés drainants, ne fait pas de sens en raison des influences marginales évoquées précédemment. Le projet de recherche a été clôturé.

Les travaux ont montré qu'il ne faut pas vouloir tirer d'enseignements sur l'histoire thermique du liant (notamment pour évaluer les causes d'une détérioration de la chaussée) par une analyse des propriétés mécaniques de l'enrobé compacté. Cette conclusion s'applique même lorsque l'épreuve de formulation est disponible car, dans tous les cas de figure, de nombreux effets se superposent.

## Summary

In the discussion of the reason for pavement damages often an overheating of the binder is considered. This occurs especially where polymer modified bitumen have been used, because it is unknown how much the extraction process alters the properties of the binder. Therefore, a method to prove asphalt concrete overheating damage without extraction is highly desired, especially if it can be directly applied to compacted specimens. But even if an overheating of the binder has been proven, it is still unclear to which degree asphalt concrete properties are influenced by the damaged binder.

This research project investigated the question, whether an overheating of the binder can be proven directly on cores of the damaged asphalt pavement without the extraction process. To address these points, hot mix asphalt was produced in the laboratory, artificially aged and tested by mechanical tests. To study the different ageing behaviour, dense and open graded asphalt concrete as well as mastic asphalt were produced in the laboratory. Although mastic asphalt is only 10% of the hot mix production in Switzerland, this asphalt type was included in the research because of its much higher production temperatures, which make this material especially sensitive to thermal damage of the temperature sensitive polymer bitumen.

It has been found that it is not possible to show an overheating during production directly on asphalt cores without the extraction of the binder. In the case of asphalt mastic, it was observed that the stirring process in the lab produced larger amounts of fines, leading to an excessive stiffening of the bituminous mortar. This hardening is independent of the aging temperature and only influenced by the stirring time, which has been concluded from the determination of the filler. In the case of asphalt concrete, a higher thermal stress stiffens the binder, which leads to higher marshall stability and cyclic compression test values. On the other hand, the higher binder stiffness decreases the compactibility. As a consequence, the air void content becomes higher, resulting in reduced marshall stability. It is difficult to reach any valid conclusion because of these opposing impact factors.

For these reasons, it became clear that it was not possible to reach the defined goals and the research team decided to abandon the project. Therefore, the planned tests on porous asphalt concrete were not carried out.

This research has shown that the investigation of the mechanical properties of an asphalt layer cannot prove an overheating of the binder. This happens because there are too many opposing factors influencing the results, which cannot be considered separately.



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Bei der Herstellung von Belägen mit polymermodifiziertem Bitumen (PmB) kommt es in der Praxis immer wieder vor, dass das PmB im Strassenbelag durch thermische Belastung gegenüber seinem ursprünglichen Zustand zum Zeitpunkt der Herstellung verändert wurde. Folgende Gründe können dafür verantwortlich sein:

- zu hohe Temperaturen beim Transport des PmB vom Hersteller zur Asphaltmischanlage
- zu hohe Lagertemperaturen im Tank der Asphaltmischanlage

Zu lange Lagerung im Tank der Asphaltmischanlage, insbesondere wenn gleichzeitig das Bindemittel Kontakt zu Luft hat. Dies tritt bei halbvollem Tank ohne Schwimmdeckel auf.

- Kontakt mit überhitzten Mineralstoffen beim Mischen
- zu hohe Mischtemperaturen bei der Mischgut/Gussasphaltherstellung
- zu lange Transportzeiten (Stau, grosse Distanzen) bei hohen Temperaturen des Mischgutes vom Mischwerk zur Baustelle
- zu lange Lagerzeiten des Mischgutes/Gussasphaltes im Silo der Asphaltmischanlage bzw. im Kocher durch unvorhergesehene Umstände (plötzlicher Regen, Verzögerungen auf der Bau-stelle, etc.)

Bei einer übermässigen thermischen Belastung des Polymerbitumens wird sowohl das Bitumen als auch das Polymer geschädigt. Die Überhitzung eines Bindemittels kann nicht alleine durch eine Grenztemperatur beschrieben werden, sondern wird durch die Bindemitteltemperatur und die Verweilzeit bei dieser Temperatur definiert. Da die Schädigung ein chemisch-physikalischer Prozess ist, der durch die Diffusion des Sauerstoffs und die Geschwindigkeit der chemischen Reaktionen beeinflusst wird, ist der Temperatureinfluss grösser als die Zeit. Vereinfacht gilt, dass eine Temperaturerhöhung um 10°C die Reaktionsgeschwindigkeit und damit die Bindemittelalterung verdoppelt.

Die Alterung des Bitumens und der Polymerabbau können gegenläufige Auswirkungen haben indem eine Verhärtung des Bindemittels durch Oxidation parallel zu einer Viskositätsverminderung durch die Spaltung langer Polymermolekülketten in kürzere auftreten kann. In diesen Fällen sind die aufgetretenen Schädigungen mit einfachen Laborprüfungen wie beispielsweise der Nadelpenetration nicht feststellbar, da sich beide Einflüsse gegenseitig kompensieren. Häufig wird vor allem das Polymer geschädigt, da dieses in der Regel hitzeempfindlicher ist als das Bitumen [1]. In der Schweiz werden praktisch ausschliesslich PmB verwendet, die mit Styrol-Butadien-Styrol-Blockpolymeren (SBS) modifiziert sind, eingesetzt. Diese besitzen aufgrund der Doppelbindungen im Poly-Butadienteil Schwachpunkte, die durch reaktive Substanzen angegriffen werden.

Überhitzte PmB zeigen gegenüber dem Originalzustand veränderte Eigenschaften bei tiefen und/oder hohen Temperaturen, was sich direkt auch auf das Verhalten des Mischgutes und der erstellten Strassenbeläge auswirken kann. Über das Ausmass der Einflüsse auf das Verhalten des Strassenbelages ist wenig bekannt, da das Bindemittel nur eine von mehreren Komponenten ist, die das Verhalten eines Belages bestimmen. Trotzdem

haben mutmassliche Überhitzungen des Bindemittels schon zu hitzigen Diskussionen und Rechtsstreitereien geführt. Vor allem Gussasphalt, der einerseits bei sehr hohen Temperaturen (bis ca. 240°C) hergestellt und verarbeitet wird und andererseits über längere Distanzen transportiert werden muss, ist das Potential einer Bindemittelüberhitzung gross. Es wird teilweise behauptet, dass bei der Ankunft auf der Baustelle der grösste Teil des Polymers schon abgebaut ist. Andererseits wird argumentiert, dass die hohen Temperaturen keine übermässige Oxidation bewirken, da im Gegensatz zu Walzasphalt praktisch keine Luft hinzutreten kann und so die Oxidation des PmB gering ist.

Eine Klärung dieser Fragen ist nicht einfach, da das PmB oft nicht direkt untersucht werden kann. Denn dazu ist eine Bindemittelrückgewinnung notwendig, wo Zweifel bestehen, ob in jedem Fall das PmB vollständig extrahiert werden kann. Abgesehen davon kann durch die Extraktion die Mikrostruktur des Polymergerüsts im PmB verändert werden, was ebenfalls zu veränderten Eigenschaften des Bindemittels führt. Einzig an PmB, die ein bei Raumtemperatur lösliches Polymer enthalten (beispielsweise unvernetztes SBS), kann mittels Gelpermeationschromatographie direkt der Polymerabbau nachgewiesen werden, da bei dieser Methode die Mikrostruktur des Polymers keine Rolle spielt. Bei anderen Polymeren wie EVA (Ethylen-Vinylacetat-Copolymer) oder vernetztem SBS versagt diese Methode, da diese Polymere nicht oder nur bei hohen Temperaturen löslich sind.

Ausserdem kann aus den Resultaten am zurückgewonnen Bindemittel nur bedingt auf die Eigenschaften des Strassenbelages geschlossen werden, da Mineralstoffe und Füller einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Verhalten des Belages haben. Auch wenn also beim extrahierten Bindemittel eine Veränderung zum Ausgangsbindemittel festgestellt werden kann, ist eine Aussage über das Verhalten des PmB im Strassenbelag schwierig. Diese Ausgangslage hat dazu geführt, dass in der VSS-Expertenkommission EK 4.04 angeregt wurde, diese Problematik genauer zu untersuchen.

Es wäre angesichts der dargestellten Sachlage ein grosser Vorteil, wenn nicht das extrahierte Bindemittel, sondern der Strassenbelag selbst in der Form von Bohrkernen beurteilt werden könnte. In diesem Forschungsprojekt soll deshalb untersucht werden, ob und wie ohne Extraktion des Bindemittels eine Überhitzung des PmB nachträglich in Bohrkernen des Strassenbelages nachgewiesen werden kann.

## 1.2 Stand der Forschung

Die Forschung im Bereich der PmB-modifizierten Beläge [2] konzentriert sich hauptsächlich auf den Einsatz neuer Polymerbitumen oder speziellen Zusätzen mit besseren Tief- und Hochtemperatureigenschaften [3] sowie der Entwicklung geeigneter Prüfverfahren zur Beurteilung der komplexen Eigenschaften von polymerhaltigen Strassenbelägen [4, 5]. Untersuchungen bezüglich Verhärtung beschränken sich in der Regel auf Untersuchungen am reinen Bindemittel [6, 7]. Eine aktuelle systematische Studie über den Einfluss von überhitztem PmB auf die Eigenschaften unterschiedlicher Beläge fehlt weitgehend.

Der Einfluss von Sauerstoff, Licht und anderen Substanzen auf die Stabilität von verschiedenen Polymeren ist umfassend untersucht worden. Im Falle von Styrol-Butadien-Styrol-Blockpolymeren (SBS) führt dies oft zu einer Spaltung der Polymerketten, wodurch die Funktionalität des SBS weitgehend verloren geht [8, 9, 32]. Die Oxidation von SBS

verläuft über verschiedene Stufen (Abbildung 1). Als besonders reaktiv gelten die in Allyl-stellung stehenden Wasserstoffatome der zahlreichen Doppelbindungen des Butadien-Polymeranteils, während der Styrol-Polymeranteil weniger empfindlich ist. Als erstes wird ein solches Wasserstoffatom durch ein Radikal abgespalten, wodurch ein relativ stabiles Radikal gebildet wird. Dieses kann nun beispielsweise mit Sauerstoff zu einem reaktiven Alkoxy-Radikal reagieren, das darauf sehr unterschiedliche Reaktionswege einschlagen kann. Bei hohem SBS-Gehalt führt dies durch Querpolymerisierung zu einem dreidimensionalen Netzwerk, in der Gegenwart von über 90% Bitumen ist dieser Weg nicht mehr so häufig. Die Radikale reagieren vor allem mit den unterschiedlichen Bitumenmolekülen. Eine weitere Möglichkeit ist die Spaltung der Polymerkette unter Bildung von reaktiven Aldehyden. Durch die Spaltung geht die Funktionalität des SBS verloren und das Polymerbitumen verliert die positiven Eigenschaften mit jedem abgebauten SBS.

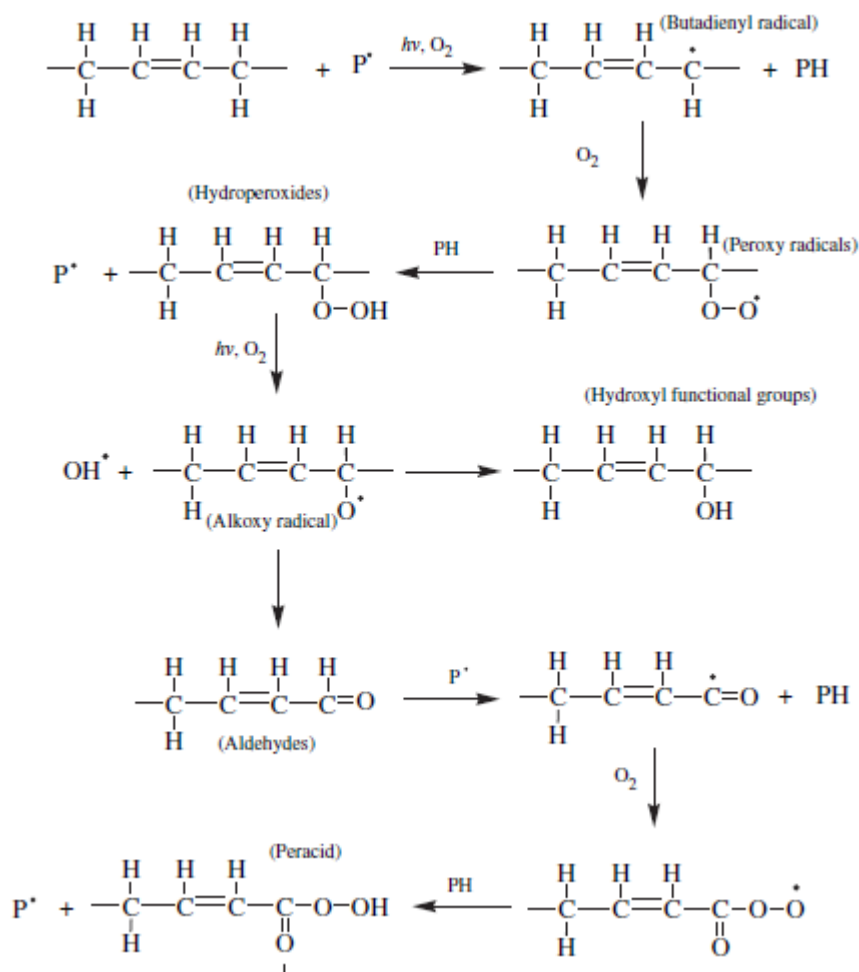


Abbildung 1: Reaktionsmechanismus von SBS gemäss [8]

Dieser Polymerabbau kann beispielsweise mittels Gelpermeationschromatographie (GPC) sichtbar gemacht werden, wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben wird.

In [10] wurde überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der elastischen Rückstellung eines PmB und den Gebrauchseigenschaften besteht. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Asphaltvarianten einer thermischen Beanspruchung im Labor unterzogen und danach das Bindemittel rückgewonnen und untersucht. Obwohl das Ziel dieser Arbeit

ähnlich wie dasjenige des vorliegenden Projektes ist, wurde ein völlig anderer Weg eingeschlagen, denn es wurde das Bindemittel aus dem Mischgut rückgewonnen. Im vorliegenden Projekt war es das Ziel die thermische Beanspruchung des Bindemittels aufgrund der (mechanischen) Eigenschaften des Mischgutes zu beurteilen, ohne das Bindemittel zu extrahieren und einzugrenzen.

### **1.3 Auftrag und Forschungsziele**

In diesem Forschungsprojekt wird nach Lösungen gesucht, um Überhitzungen des PmB nachträglich im fertigen Strassenbelag nachweisen und beurteilen zu können. Dazu sollen verschiedene Belagstypen und PmB auf ihr Verhalten bei gezielter Überhitzung studiert werden. Durch direkten Vergleich von Prüfkörpern, hergestellt aus nicht überhitztem Gussasphalt (resp. Mischgut) und Prüfkörpern nach definierter thermischer Belastung sollen Unterschiede bestimmt werden. Es soll untersucht werden, welche Prüfverfahren sich für diese Differenzierung am besten eignen. Dabei sollen die Belageigenschaften sowohl bei hohen als auch bei tiefen Temperaturen beurteilt werden. Auch das Ermüdungsverhalten bei mittleren Temperaturen soll in Betracht gezogen werden.

## 2 Materialien

### 2.1 Charakterisierung der Gesteinskörnungen

Für alle Mischungen wurden die gleichen Splitte der Aufbereitungsanlage BAV Volketswil verwendet (siehe Anhang I.2). Für Gussasphalt wurde ein Rundsand (Gebenstorf) und für den Walzasphalt ein Brechsand 0/3 aus Wil eingesetzt. Die Gesteinskörnungen wurden mit Ausnahme des Rundsands zusätzlich in engere Fraktionen ausgesiebt, um Asphaltmischungen besser reproduzieren zu können. Als Füller wurde sowohl beim Walzasphalt auch beim Gussasphalt ein Kalksteinfüller (Heidelberger Zement Istein) verwendet.

### 2.2 Charakterisierung der Bindemittel

Für die Auswahl der zu verwendenden Polymerbitumen (PmB) wurde bei erfahrenen Fachleuten aus der Praxis eine Umfrage durchgeführt, um die in der Schweiz oft verwendeten Bindemittel zu eruieren. Da die Wahl der PmB stark von der vorgesehenen Verwendung abhängt, wurden bei der Umfrage die im Forschungsprojekt geplanten Mischgutsorten berücksichtigt (Rauasphalt AC MR, offenporiger Asphalt PA und Gussasphalt MA). Zum Zeitpunkt der Umfrage gab es auf dem Schweizer Markt ein plastomermodifiziertes Bindemittel.

Die Eigenschaften der in Tabelle 1 aufgeführten Polymerbitumen sind im Anhang I.1 aufgelistet.

*Tabelle 1: Liste der vorgesehenen PmB*

Bezeichnung	Sorte (SN 670210a [11])	Anwendung	Bemerkung
<b>PmB-A</b>	PmB 45/80-50 (CH-C)	für AC	elastomer-modifiziert
<b>PmB-B</b>	PmB 25/55-55 (CH-C)	für AC	plastomer-modifiziert
<b>PmB-C</b>	PmB 25/55-55 (CH-C)	für MA	elastomer-modifiziert
<b>PmB-D</b>	PmB 25/55-65 (CH-E)	für MA	elastomer-modifiziert
<b>PmB-E</b>	PmB 10/40-60 (CH-C)	für AC	elastomer-modifiziert
<b>PmB-G</b>	PmB 45/80-65 (CH-E)	für PA	elastomer-modifiziert

Die Wahl der Bindemittel fiel auf verschiedene Lieferanten, um produktspezifische Einflüsse zu vermeiden.

Zum Zeitpunkt der Auftragserteilung spielte ein plastomermodifiziertes PmB eine gewisse Rolle im Markt. Im Verlauf der Arbeiten wurde dieses Produkt in Vorversuchen eingesetzt, später aber nicht mehr weiterverwendet, da es – als einziges plastomermodifiziertes PmB – völlig vom Markt verschwand.

## 3 Methodik

### 3.1 Wahl des Belagtyps

Der Anwendungsbereich von PmB lässt sich grob in drei Bereiche respektive Belagsarten aufteilen, für die jeweils spezielle PmB-Sorten [11] benötigt oder Einbauverfahren angewendet werden:

- Asphaltbeton (AC): PmB-Klasse C
- Offenporiger Asphalt (PA), Splittmastixasphalt (SMA), Rauhasphalt (AC MR): PmB-Klasse E (verschärfte Anforderungen)
- Gussasphalt (MA): PmB-Klasse C

Deshalb werden in dieser Forschungsarbeit auch drei verschiedene Mischgutsorten untersucht. Neben Gussasphalt wurde entschieden, Asphaltbeton und offenporiger Asphalt zu wählen, da diese Typen die beiden Extreme zwischen dichtem und offenporigem Strassenbelag darstellen. Splittmastix- und Rauhasphalt liegen mit ihren Eigenschaften zwischen Asphaltbeton und offenporigem Asphalt. Bei allen Mischgutsorten wird ein Splitt mit Grösstkorn 8 mm verwendet. Dies entspricht einer mittleren Körnung und ermöglicht auch die Herstellung von relativ homogenen Laborprüfkörpern.

#### **Asphaltbeton AC**

Asphaltbeton ist nach wie vor die häufigste verwendete Mischgutsorte.

#### **Offenporiger Asphalt PA**

Infolge des sehr hohen Hohlraumgehaltes ist der Bindemittelfilm bei dieser Mischgutsorte stark exponiert; in Bezug auf die Temperaturbeanspruchung während dem Mischen und der Aufbereitung dürfte diese Mischgutsorte von den Walzbelägen am stärksten beansprucht sein.

#### **Gussasphalt MA**

Die Verwendung von Polymerbitumen bei Gussasphaltbelägen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Gussasphalte werden bei Temperaturen aufbereitet, die um ca. 60°C oberhalb derjenigen von Asphalt-Betonbelägen liegen. Die Stabilität der Polymere bei hohen Temperaturen spielt bei diesen Belagssorten eine sehr grosse Rolle.

Für den Nachweis der Überhitzung waren verschiedene Prüfmethode vorgesehen, um die Eigenschaften von verdichteten Prüfkörpern bei verschiedenen Temperaturen und Lagerzeiten zu bestimmen.

In einem ersten Schritt war geplant die in der Projekteingabe vorgeschlagenen Prüfmethode an einem Gussasphalt MA 8 und an einem Asphaltbeton AC 8 S an den Extrempunkten zu testen, um zu sehen wie gross der beobachtete Unterschied in den Resultaten ist. Falls die Differenz in einer Prüfmethode ungenügend ist, sollte nach einer alternativen Prüfung gesucht werden.

## 3.2 Wahl der Prüfmethode

Gemäss Forschungsziel soll der Nachweis der PmB-Alterung primär mittels mechanischen Prüfmethode an Mischgutprobekörpern erfolgen, um eine Extraktion des Bindemittels zu umgehen. Aufgrund der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen war vorgesehen, Prüfungen für die Beurteilung der Hoch- und Tieftemperatureigenschaften sowie des Widerstandsvermögens gegen Ermüdung und Wasserempfindlichkeit durchzuführen. Daraus soll ersichtlich werden, in welchem Zusammenhang die Bindemittelschädigung den grössten Effekt auf die Belageigenschaften hat und welche Prüfung sich als Indikator für eine Bindemittelüberhitzung eignen könnte.

Folgende Prüfmethode waren für die Bestimmung der verschiedenen Eigenschaften im Forschungsantrag vorgeschlagen worden:

### Kälteverhalten

Für das Verhalten bei tiefen Temperaturen ist die Bestimmung des komplexen Moduls mit dem Ko-Axialen Schubtest (KAST) im Temperaturbereich -20 bis +20°C gewählt worden [12]. Im Verlauf des Projektes wurde dieses Prüfverfahren aufgrund der ungenügenden Wiederholpräzision durch den Indirekten Zugversuch (ITT) ersetzt [13].

### Wärmeverhalten

Der Widerstand gegen Spurbildung bei hohen Temperaturen (Wärmeverhalten) wird durch dynamische Prüfungen (einaxialer Druckschwellversuch bei Asphaltbeton und offenporigem Asphalt [14] sowie dynamische Eindringtiefe beim Gussasphalt) beobachtet werden [15].

### Ermüdungsverhalten

Die Ermüdung eines Strassenbelages spielt sich im mittleren Temperaturbereich von etwa 10 - 25°C ab. Als Prüfmethode ist die 4-Punktbiegung bei 10°C vorgesehen [16].

### Wasserempfindlichkeit

Analog dem Forschungsauftrages FA 20/99 "Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut" [17] werden Veränderungen der Wasserempfindlichkeit des Mischgutes durch mechanische Prüfungen vor/nach einer kombinierten Wasser-Frost-Tausalz-Beanspruchung untersucht.

### Chemische Veränderungen des Bindemittels

In Ergänzung zu den Prüfungen an Mischgutprüfkörpern wird punktuell an einigen ausgewählten Proben das Bindemittel chemisch untersucht. Im Vordergrund steht die Gelpermeationschromatographie (GPC) um den Abbau der Polymerketten zu beobachten.

## 3.3 Beschreibung der Prüfmethode

### 3.3.1 Ko-axialer Schubtest (KAST)

Der komplexe Schubmodul und die zugehörige Phasenverschiebung wurden bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen mit dem koaxialen Schubtest KAST nach Empa-Methode [12] bestimmt. Der koaxiale Schubtest KAST beruht darauf, dass das zwischen der inneren und äusseren Zylinderfläche befindliche Mischgut parallel zur Zylinderachse entweder kraft- oder weggesteuert sinusförmig beansprucht wird. Aus der gemessenen Verformung bzw. Kraft bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen wird der komplexe Schubmodul  $G^*$  und die Phasenverschiebung  $\delta$  berechnet.

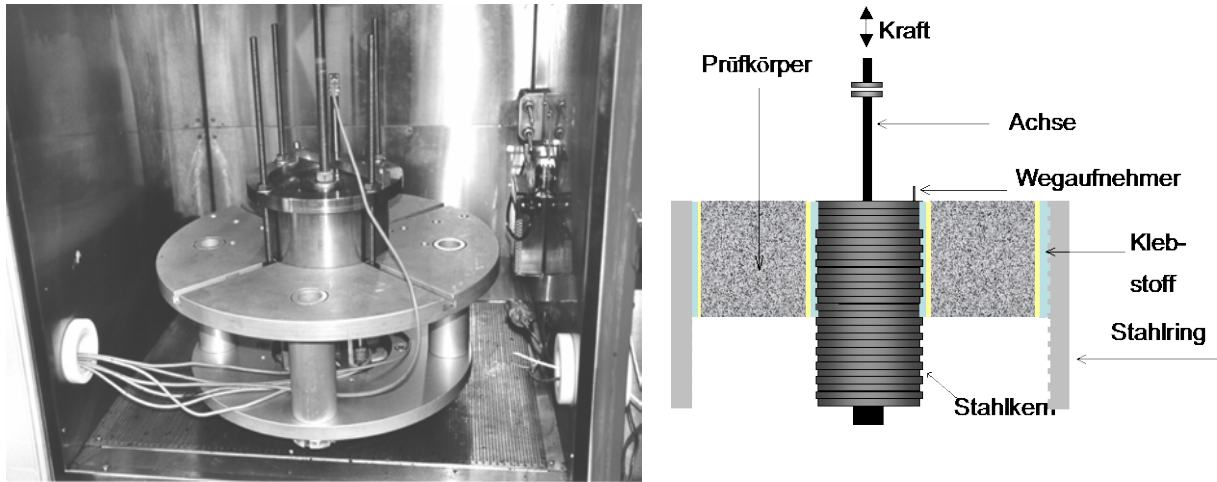


Abbildung 2: KAST Prüfeinrichtung; schematische Darstellung der Prüfung

Für die Bestimmung des komplexen Schubmoduls werden verdichtete Prüfkörper oder Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm verwendet und planparallel auf 40-60 mm Höhe geschliffen. In der Mitte des Prüfkörpers wird für die zentrale Achse ein Loch mit einem Durchmesser von 55 mm gebohrt. Der so vorbereitete Prüfkörper wurde mit einem Epoxy-Klebstoff aussen mit der Stahlmantelfläche und innen mit einer zentralen Achse verklebt.

### 3.3.2 Vierpunktbiegung

Ermüdung ist einer der Gründe für das Versagen von bitumenhaltigen Schichten. In der EN 12697-24 [16] sind verschiedene Verfahren für die Prüfung der Beständigkeit gegen Ermüdung aufgeführt, deren Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind [18]. Aus prüftechnischen Gründen wurde das 4-Punkt-Biegeverfahren an einem prismatischen Prüfkörper verwendet.

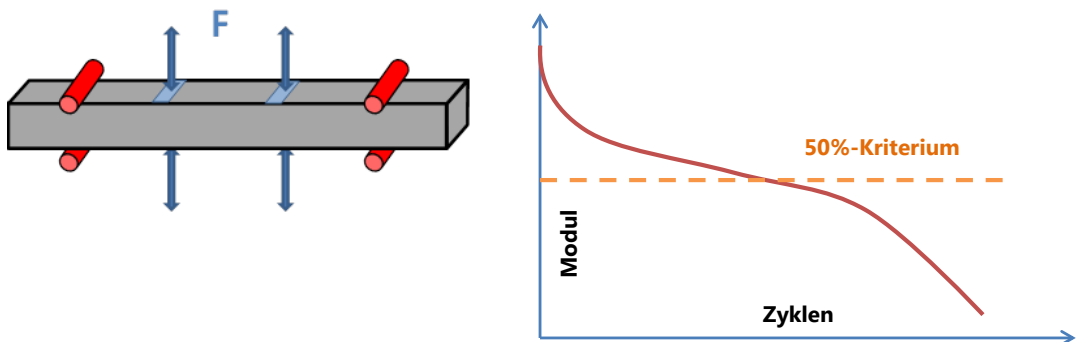


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Vierpunktbiegung mit typischer Ermüdungskurve

Der Prüfkörper wird mit einer zyklischen Haversineschwingung bei vorgegebener Frequenz, Temperatur und Deformation belastet. Als Abbruchkriterien wird entweder eine feste Zyklenzahl oder eine Reduktion des Moduls um beispielsweise 50% vorgegeben. In der Ermüdungskurve können zwei Phasen beobachtet werden. In der ersten Phase bis

zum Wendepunkt ist nach einer kurzen Anfangsphase die Abnahme des Moduls praktisch konstant. Dies wird auf die Ausbildung von Micro-Rissen zurückgeführt. Mit der Zeit bilden sich daraus grössere Risse, die schliesslich zum Versagen des Prüfkörpers führen. Diese zweite Phase ist in der Ermüdungskurve in einer schnelleren Abnahme des Moduls zu sehen.

### 3.3.3 Druckschwellversuch und dynamische Eindringtiefe

Bei den Walzasphalten wurde der einaxiale Druckschwellversuch [14] ausgewählt, beim Gussasphalt die dynamische Eindringtiefe [19]. In beiden Fällen wird ein planparallel geschliffener Prüfkörper mit einem zylindrischen Stempel einer Druck-Schwell-Belastung unterzogen. Der haversineförmigen, relativ kurzzeitigen Belastung (Oberlast) von 0.2 Sekunden folgt eine deutlich längere Lastpause von 1.5 Sekunden, in welcher nur die Schwell-Belastung (Unterlast) aufgebracht wird. Standardmässig wird die Prüfung bei einer Temperatur von 50°C durchgeführt; in besonderen Fällen kann zur besseren Spreizung der Ergebnisse die Temperatur auch erhöht werden.

Die Auswertung der beiden Prüfungen wird unterschiedlich durchgeführt:

Beim Druckschwellversuch wird in der Verformungskurve die Steigung der Kurve im Wendepunkt als Kriterium zur Beurteilung der Verformbarkeit ermittelt (siehe Abbildung 4). Die Prüfung wird spätestens nach 10 000 Lastzyklen beendet, sofern nicht bereits vorher der Wendepunkt erreicht wird. Je steiler die Kurve verläuft, desto höher ist die Verformung und desto schneller versagt der Prüfkörper.

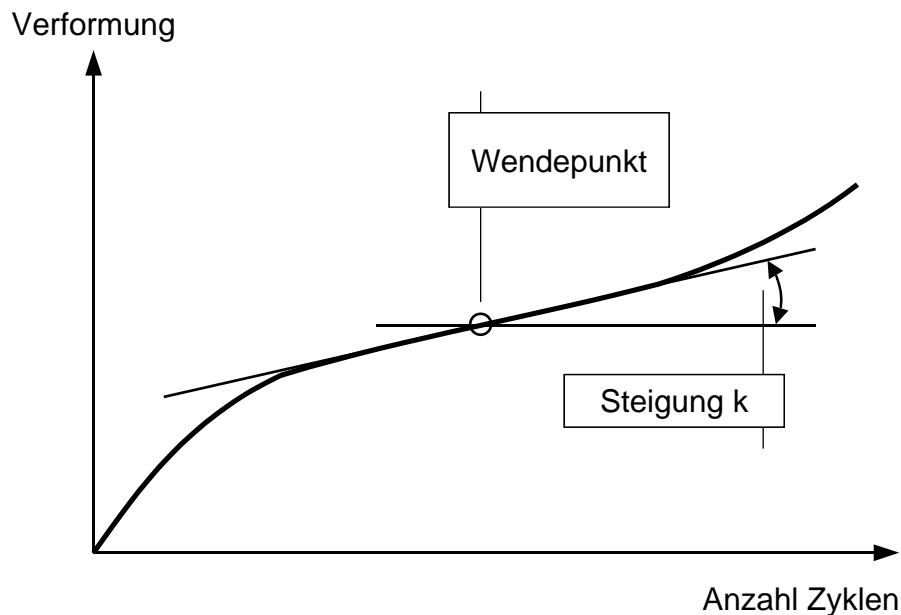


Abbildung 4: Bestimmung der Steigung im Wendepunkt einer typischen Verformungskurve im Druckschwellversuch

Bei der dynamischen Eindringtiefe gilt die Eindringtiefe nach 2500 Lastzyklen als Beurteilungskriterium. Für Forschungszwecke wird auch die Zunahme der Eindringtiefe nach weiteren 2500 Lastzyklen ausgewertet.

### 3.3.4 Gelpermeationschromatographie (GPC)

Mittels Gelpermeationschromatographie kann die Verteilung der Bindemittelkomponenten bezüglich ihrer Grösse respektive ihrer Molekularmasse bestimmt werden. [20-22]. Diese chemische Analysemethode wird oft in der Polymerchemie für die Charakterisierung von verschiedenen Polymeren eingesetzt. Das Prinzip der Gelpermeationschromatographie ist einfach: Einige Milligramm Bitumen oder PmB werden in einem geeigneten Lösemittel gelöst und auf eine spezielle GPC-Säule, die mit speziellen kleinen Partikeln gefüllt sind, gegeben (Abbildung 5). Diese Partikel sind an ihrer Oberfläche mit verschiedenen grossen Vertiefungen versehen. Kleinere Komponenten des Bindemittels können in diese Vertiefungen eindringen, wofür aber Zeit benötigt wird, grössere Teilchen fließen einfach darüber hinweg. Dadurch benötigen kleinere Teilchen mehr Zeit als grössere für das durchfliessen durch diese speziellen GPC-Säulen. Beim Austreten aus der GPC-Säule sind die Bitumenkomponenten nach ihrer Grösse aufgetrennt. Diese können durch verschiedene Detektoren gemessen werden. Da die Grösse der Teilchen mit ihrer Molekularmasse zusammenhängen, kann dadurch eine Molekularmassenverteilung erhalten werden. Auf diese Weise können insbesondere die im PmB enthaltenen Polymere analysiert werden: Unterschiedliche Molekularmassen von Polymeren, Differenzen im Polymergehalt oder ein Polymerabbau durch Überhitzung des PmB können mit dieser Methode ermittelt werden. Die GPC eignet sich aber auch zur Identifikation von Bitumen unterschiedlicher Provenienz, allerdings nicht zur Unterscheidung von Bitumen, die sich nur in ihrer Härte (Penetration) unterscheiden [1, 23]. Die GPC wird allerdings nicht zu den performanceorientierten Prüfung gezählt, da keine direkten Performancekriterien abgeleitet werden können.

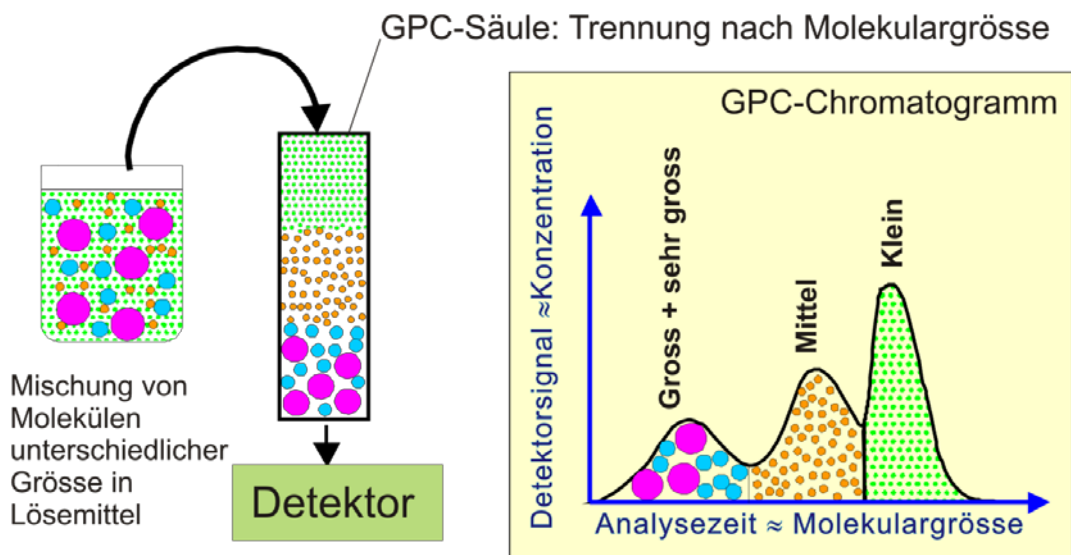


Abbildung 5: Prinzip der Gelpermeationschromatographie

## 4 Experimenteller Teil

### 4.1 Vorversuche mit Gussasphalt (Serie MA)

Das Ziel der Vorversuche war erste Erkenntnisse über die Brauchbarkeit der gewählten Prüfmethode zu gewinnen. Dazu sollten Prüfungen an den Extrempunkten, das heisst bei normalen Bedingungen (Reihe N1) und bei sehr langer und starker Überhitzung (Reihe E6) durchgeführt werden. Für höhere Temperaturen war für den Gussasphalt die dynamische Eindringtiefe ET-dyn [15] und für die tiefen Temperaturen im Bereich von -15 bis +20°C der an der Empa entwickelte Koaxiale Scherversuch KAST [12] verwendet worden.

#### 4.1.1 Mischrezept MA1

Die Optimierung der Rezeptur des Gussasphaltes für einen MA 8 erfolgte, indem die dichteste Lagerung der Mineralstoffe gesucht wurde. Es wurden die selben Mineralstoffe verwendet wie für die Walzasphalte mit Ausnahme der Sandfraktion, wo zusätzlich ein Rundsand verwendet wurde. Durch Variation der Korngrößenverteilungen konnte der kleinste Hohlraumgehalt der Mineralstoffe mittels Proctorverdichtung bestimmt werden. Die Dosierung des Bindemittelgehaltes erfolgte unter der Annahme, dass nicht nur die Hohlräume des Mineralstoff-Gerüsts zu füllen seien, sondern dass darüber hinaus bei hohen Temperaturen ein gewisser Bindemittelüberschuss bestehen soll.

*Tabelle 2: Optimiertes Mischrezept für Gussasphalt MA 8*

IMP-Nr	Fraktion	Provenienz	Masse-%
3-777-1	Füller	Istein	25.0
3-1283-1	BS 0.09 / 0.25	Wil	2.3
3-1283-2	BS 0.25 / 0.5	Wil	3.2
3-1283-3	BS 0.5 / 1	Wil	3.7
3-1283-4	BS 1/2	Wil	4.6
3-1283-5	BS 2/4	Wil	5.6
3-1283-9	RS 0/1	Gebenstorf	9.3
3-1283-10	RS 1/4	Gebenstorf	10.2
3-1283-6	Splitt 4/5.6	BAV Volketswil	14.8
3-1283-7	Splitt 5.6/18	BAV Volketswil	7.4
3-1283-8	Splitt 8/11	BAV Volketswil	6.5
3-734-1	PmB-D	BAV Volketswil	7.5
		Total	100

Dieses Verfahren zur Optimierung von Gussasphalt-Rezepturen wurde von Rubach [24]

publiziert und findet in der Praxis Anwendung. Daraus ergab sich das optimale Rezept gemäss Tabelle 2.

#### 4.1.2 Gussasphaltherstellung und Alterung

Der Gussasphalt wurde im Gussasphaltkocher hergestellt, wo direkt anschliessend auch die Alterung durchgeführt wurde. Um ein Absetzen der feinen Mineralstoffe zu verhindern, wurde der Gussasphalt während der Alterung gerührt. Damit der Abrieb möglichst klein gehalten werden konnte, wurde bei der kleinsten, möglichen Umdrehzahl von 12 U/min gerührt.

Es wurden folgende Alterungsbedingungen definiert:

- Alterung normal „MA-N1“ bei einer Temperatur von 220°C während 1 Stunde
- Alterung extrem „MA-E6“ bei einer Temperatur von 255°C während 6 Stunden

Nach der Alterung wurde der Gussasphalt in die vorbereiteten Prüfkörperformen gegossen.



Abbildung 6: Beheizbarer Gussasphalt-Laborkocher

### 4.1.3 Eigenschaften bei tiefen Temperaturen (Komplexer Modul mittels KAST-Versuch)

Für die KAST-Prüfung wurden Prüfkörper mit einer Höhe von etwas über 40 mm und einem Durchmesser von 150 mm direkt nach der Alterung gegossen. Die Prüfkörper wurden danach plan-parallel auf eine Höhe von 40 mm geschliffen und in die KAST-Prüfformen eingeklebt.

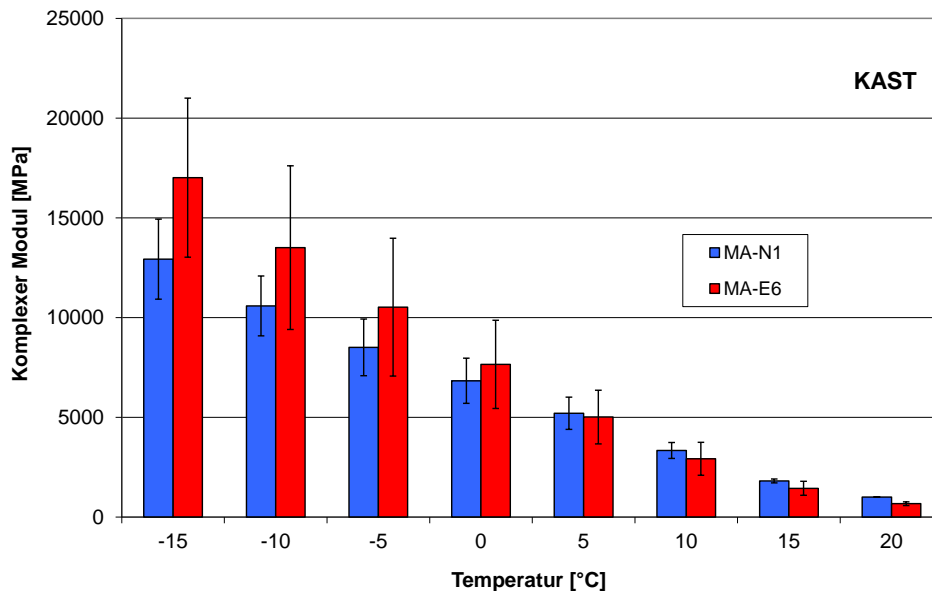


Abbildung 7: Modulbestimmung mittels KAST bei verschiedenen Temperaturen und konstanter Frequenz von 1 Hz (MA-N1: ohne Alterung; MA-E6 mit extremer Alterung)

In Diagramm Abbildung 7 sind die Resultate der KAST-Versuche bei Temperaturen zwischen -15 und +20°C dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass die Streuung der komplexen Moduli einer Temperatur teilweise grösser war als der Unterschied zwischen den beiden Serien E6 und N1. Vor allem im tiefen Temperaturbereich war die Wiederholbarkeit der Resultate ungenügend. Dies ist vermutlich auch auf die hohe Steifigkeit der Prüfkörper zurückzuführen, die schon in den Bereich der Steifigkeit der Prüfmaschine kam. Diese Resultate zeigen klar, dass diese Prüfung nicht für die Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften geeignet ist. Als Ersatz soll deshalb der indirekte Zugversuch [13] verwendet werden.

#### 4.1.4 Eigenschaften bei hohen Temperaturen (Dynamische Eindringtiefe ET-dyn)

Die dynamische Eindringtiefe wurde gemäss deutscher TP-A StB bei 50°C durchgeführt [15]. Analog zu den Prüfkörpern für den KAST-Versuch wurden Prüfkörper mit einer Höhe von 60 mm und einem Durchmesser von 150 mm hergestellt.

*Tabelle 3: Resultate der dynamischen Eindringprüfung ET-dyn bei 50°C*

Probe	Alterung Zeit [h] / Temperatur[C°]	ET dyn 2500 [mm]				ZET dyn [mm]	
		Mittelwert	Einzelwerte		Mittelwert	Einzelwerte	
<b>MA1.1-N1</b>	1 / 220 °C	1.76	1.67 / 1.84		0.61	0.58 / 0.64	
<b>MA1.1-E6</b>	6 / 255 °C	0.94	0.88 / 1.00		0.31	0.29 / 0.33	

Die Prüfkörper zeigen einen deutlichen Unterschied in der dynamischen Eindringtiefe nach 2500 Zyklen. Auch die Zunahme der dynamischen Eindringtiefe zwischen 2500 und 5000 Zyklen ist markant unterschiedlich. In einem weiteren Versuch soll untersucht werden, ob eine Erhöhung der Prüftemperatur von 50 auf 60°C zu einer weiteren Vergrößerung der Unterschiede führt.

*Tabelle 4: Resultate der dynamischen Eindringprüfung ET-dyn bei 60°C*

Probe	Alterung Zeit [h] / Temperatur[C°]	ET dyn 2500 [mm]				ZET dyn [mm]	
		Mittelwert	Einzelwerte		Mittelwert	Einzelwerte	
<b>MA1.2-N1</b>	1 / 220 °C	1.52	1.50 / 1.55		0.46	0.47 / 0.44	
<b>MA1.2-E6</b>	6 / 255 °C	1.15	1.09/1.21		0.44	0.44 / 0.44	

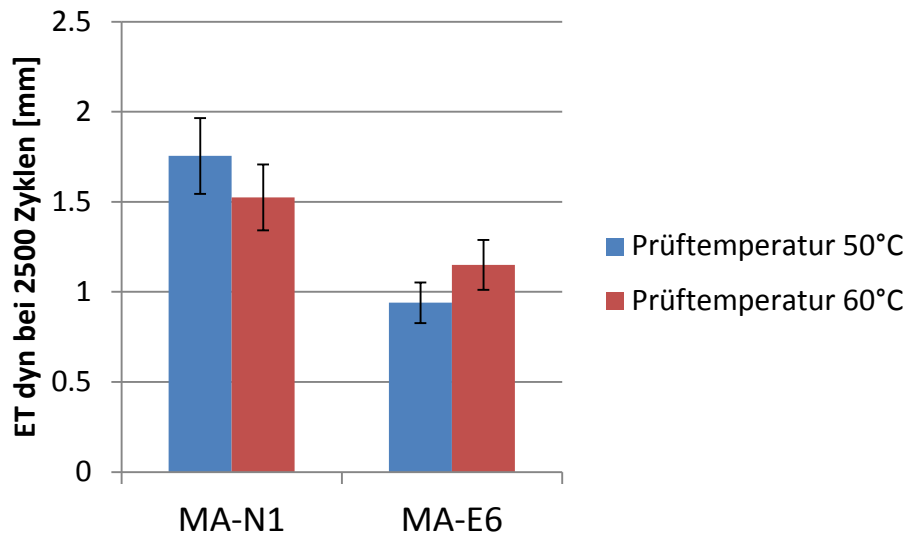


Abbildung 8: Dynamische Eindringtiefe bei verschiedenen Prüftemperaturen

Die Veränderung der Prüftemperatur bewirkte bei der Alterung N1 eine Abnahme der Eindringtiefe um 0.24 mm, bei der Alterung E6 eine Zunahme um 0.21 mm. Die geschätzte Wiederholgrenze der dynamischen Eindringtiefe wurde in [19] zu 12 % geschätzt. Da hier verschiedene Prüftemperaturen angewendet wurden, ist davon auszugehen, dass die festgestellten Unterschiede im Bereich der Wiederholgrenze liegen.

Die dynamische Eindringtiefe vermag, selbst bei erhöhter Prüftemperatur, keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden, sehr unterschiedlich gealterten Gussasphalte aufzuzeigen.

#### 4.1.5 Untersuchung der Gussasphaltherstellung

Um die Unterschiede bei der Gussasphaltherstellung genauer zu untersuchen, wurden drei Mischungen hergestellt und bei gleicher Temperatur (220°C) unterschiedlich lang gealtert, respektive gemischt. Bei den drei Mischungen wurde die Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt und am rückgewonnenen Bindemittel Penetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt (Tabelle 5).

Diese erweiterte Untersuchung am Gussasphalt zeigt, dass der Feinanteil mit zunehmender Kochzeit – trotz niedriger Umdrehzahl - grösser wird. Pro Stunde Kochzeit nimmt der Fülleranteil und der Sand unter 1 mm um etwa 0.5% zu. Der veränderte Fülleranteil hat einen Einfluss auf die Prüfresultate, doch lassen sich die Unterschiede in der dynamischen Eindringtiefe nicht in die Anteile „erhöhter Füllergehalt“ und „härteres Bindemittel“ aufteilen. Erstaunlicherweise ist auch keine Differenzierung der Gussasphalte mittels Spaltzug bei -5°C möglich.

Tabelle 5: Untersuchung der Gussasphaltherstellung

	MA1.4	MA1.5	MA1.6
Alterung Zeit [h]	1	6	12
Kochtemperatur[C°]	220	220	220
Füllergehalt [M-%]	29.7	32.2	36.2
Durchgang 1 mm [M-%]	52.3	54.0	56.3
Lösl. Bindemittelgehalt [M-%]	7.51	7.51	7.66
ERK [°C]	63.7	70.9	93.0
Penetration [0.1 mm]	32	24	13
Spaltzug -5°C [kN]	31.6	31.6	29.2

Hingegen wird deutlich eine zunehmende Verhärtung des Bindemittels beobachtet, wie die Resultate der Penetration und des Erweichungspunktes des rückgewonnenen Bindemittels zeigen.

#### 4.1.6 Untersuchung des Polymerabbaus mittels GPC

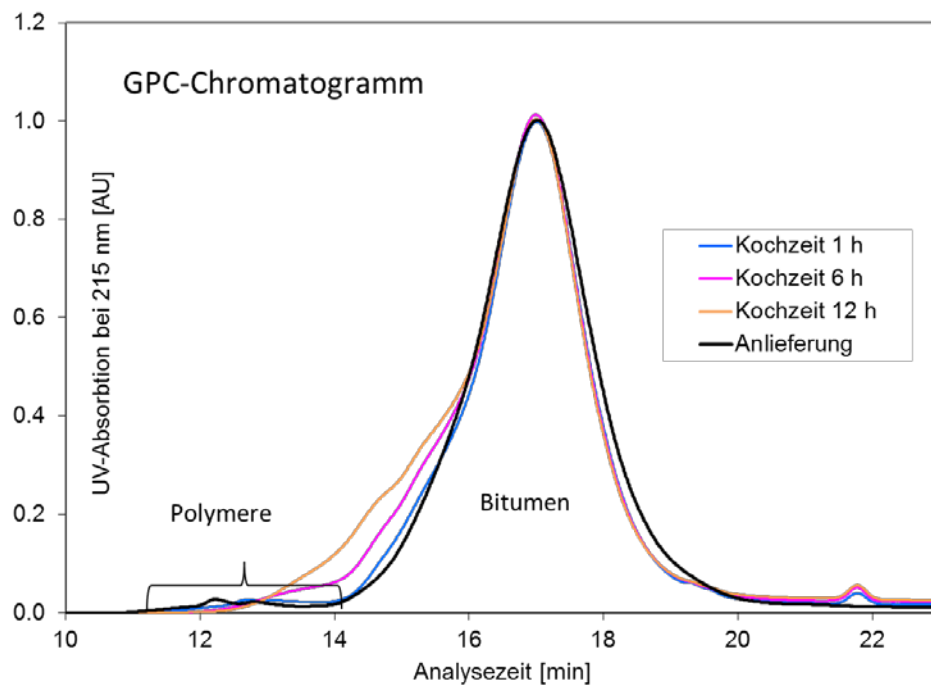


Abbildung 9: Überlagerte GPC-Chromatogramme der extrahierten Bindemittel

Im Rahmen der erweiterten Untersuchung der Gussasphaltherstellung wurde das Bindemittel extrahiert und untersucht. Dabei wurden auch GPC-Analysen durchgeführt, um das Alterungsverhalten des Bindemittels und insbesondere der darin enthaltenen Polymere zu untersuchen.

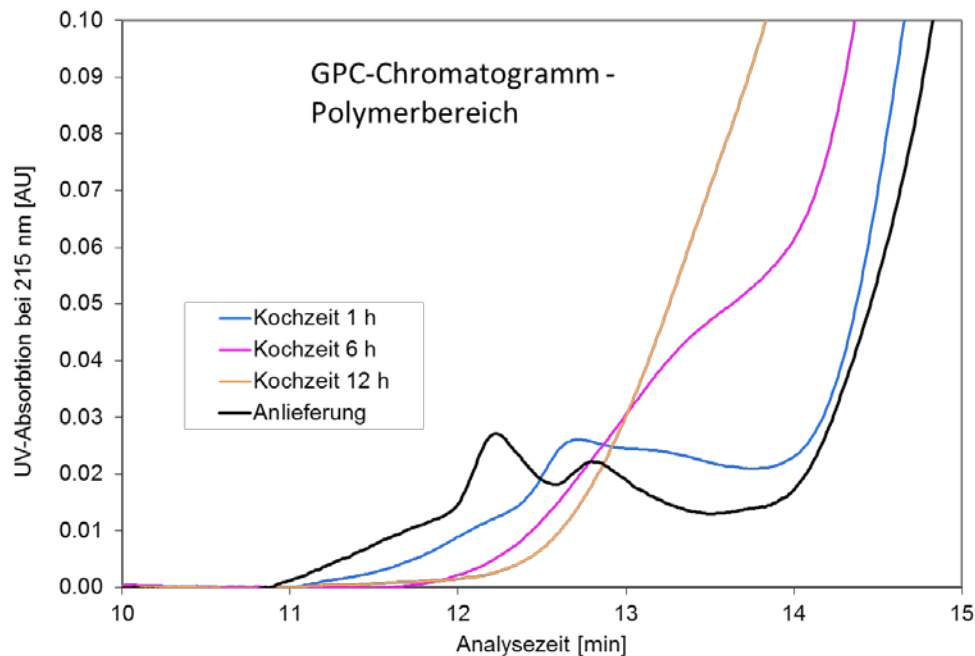


Abbildung 10: Vergrößerter Ausschnitt des Polymerbereiches im GPC-Chromatogramm

In Abbildung 10 ist deutlich sichtbar wie die Polymere im Bindemittel des Gussasphaltes während des Kochens abgebaut werden. Die beiden Polymer-Peaks im Chromatogramm der Anlieferung sind nach einer Stunde schon stark reduziert und nach 6 h überhaupt nicht mehr sichtbar. Dies bedeutet, dass das ursprüngliche Polymer in kleinere Einheiten zerfallen sind und ihre ursprüngliche Funktion weitgehend verloren haben. In Abbildung 9 ist auch die zunehmende Alterung des Bitumens erkennbar. Diese drückt sich durch eine Verbreiterung des grossen Bitumenpeaks auf der linken Seite aus, in Richtung grössere Moleküle. Dies wird durch eine Umwandlung von Maltenen in Asphaltene erklärt, die durch Agglomeration und chemische Reaktionen mit Sauerstoff entstehen.

## 4.2 Vorversuche 1 mit Asphaltbeton (Serie ACP)

Analog zum Gussasphalt wurden auch Vorversuche am Walzasphalt durchgeführt, um erste Informationen in den Extrempunkten zu erhalten, das heisst bei Normalbedingungen (N1) und bei Extrembedingungen (E6). Die Vorversuche wurden mit dem Bindemittel PmB-B (Tabelle 1) durchgeführt, für das die vom Hersteller empfohlene Mischtemperatur 170 °C beträgt. Dementsprechend wurden die Extrembedingungen mit einer um 40°C höheren Temperatur (210 °C) und nach 6 h Lagerdauer bei dieser Temperatur definiert.

### 4.2.1 Prüfkörperherstellung

Als Mischguttyp wurde ein AC 8 N gewählt, der aus Mineralstoffen und Bindemittel bei den definierten Temperaturen in einem Labormischer in 30 kg Chargen hergestellt wurde. Die Alterung des Mischgutes wurde in geschlossenen Kübeln bei der Mischtemperatur für die vordefinierte Zeit im Ofen durchgeführt, was die Lagerung des Mischgutes im Heissilo simulieren sollte. Nach der Alterung wurde das Mischgut für die in den Prüfungen notwendigen Portionen aufgeteilt.

Für die Prüfkörperherstellung wurde das Mischgut wiedererwärmt, geteilt und auf die Verdichtungstemperatur erhitzt. Prüfkörper mit Durchmesser 100 mm wurden mit dem Marshallhammer gemäss EN 12697-30 [25] hergestellt, während für die grösseren Prüfkörper mit 150 mm Durchmesser die Methode mit dem Gyratorverdichter gewählt wurde [26]. Damit wurden Prüfkörper mit einer Höhe von 100 – 110 mm hergestellt. Bei der Gyratorverdichtung wird der Verlauf der Verdichtung direkt verfolgt, wodurch wichtige Zusatzinformationen über den Verdichtungsverlauf erhalten werden. Je steiler die Verdichtungskurve verläuft, desto besser lässt sich ein Mischgut verdichten und desto schneller ist der Endwert in der Regel erreicht (Abbildung 11).

*Tabelle 6: Marshallverdichtung bei 140°C*

	Hohlraumgehalt [Vol-%]	Marshall-Stabilität [kN]	Marshall-Fliessen [mm]
<b>ACP-N1</b>	2.4	14.4	4.3
<b>ACP-E6</b>	7.2	14.9	2.8
<b>Sollwerte AC 8N [27]</b>	2 ... 5	≥7.5	2 ... 4

Da es sich um einen Vorversuch handelte wurde die Mischung nicht vollständig optimiert.

Um mit dem Gyrator eine ähnliche Verdichtung wie bei der Marshallverdichtung (Hohlraumgehalt 2.4 Vol.-%) zu erreichen, wurde zuerst ein Gyrator-Versuch mit bis zu 204 Umdrehungen gefahren. Anschliessend wurde aus der ermittelten Verdichtungskurve jene Anzahl Umdrehungen abgelesen, welche erforderlich ist um die gewünschte Verdichtungsleistung (= Marshall) zu erreichen, das heisst, wo der gleiche Hohlraumgehalt erreicht wurde.

*Tabelle 7: Gyratorverdichtung bei 140°C*

	Anzahl Gyrationen	Hohlraumgehalt [Vol-%]		Höhe der Prüfkörper [mm]
		volumetrisch	gemessen	
<b>ACP-N1</b>	57	3.2	1.8	100
<b>ACP-E6</b>	57	5.8	4.3	102.8

Da die volumetrische Raumdichte, die während der Gyratorverdichtung über die gemessene Prüfkörperhöhe errechnet wird, etwas höher ist als die durch Tauchwägung bestimmte Raumdichte SSD, wurde für den Hohlraumgehalt ein um 1% höherer Zielwert von 3.4% angestrebt. Dieser volumetrische Hohlraumgehalt wurde nach 57 Umdrehungen erreicht. Allerdings wurde der Unterschied zwischen volumetrisch berechneter und gemessener Raumdichte etwas unterschätzt, so dass bei der Serie N1 ein effektiver Hohlraumgehalt von nur 1.8% anstelle von 2.4% erreicht wurde.

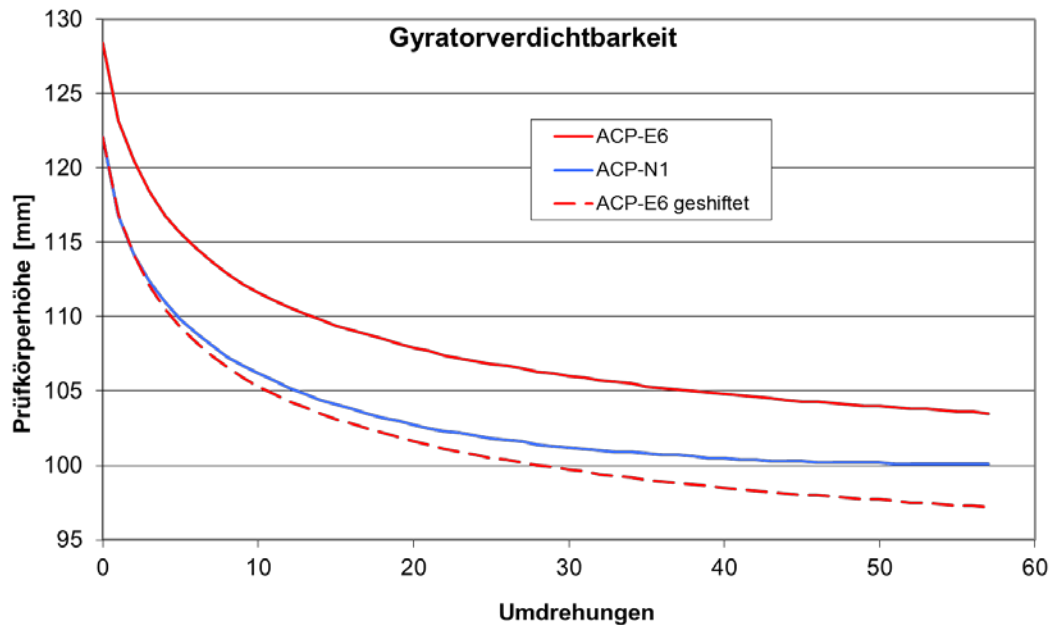


Abbildung 11: Verdichtungskurven für die Gyratorverdichtung

Um den Verlauf der beiden Kurven besser miteinander vergleichen zu können, wurde die rote Kurve (ACP-E6) an den gleichen Anfangspunkt wie ACP-N1 verschoben (gestrichelte Kurve).



Abbildung 12: Gyratorprüfkörper der Serie N1 und E6 mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt

Analog der Marshallverdichtung spricht die Gyratorverdichtung auf die Verhärtung des Bindemittels an. Die Werte für Hohlraumgehalt und Prüfkörperhöhe sind für die Serie N1 und E6 recht unterschiedlich. Auch die Steigung der Verdichtungskurven unterscheiden

sich voneinander (Abbildung 11). Während die Prüfkörper der Serie N1 nach rund 50 Umdrehungen auf dem Endverdichtungswert sind, ist die Verdichtungskurve für die Serie E6 steiler, beginnt allerdings auch bei einer grösseren Anfangshöhe und erreicht die Endverdichtung später.

Die Verhärtung des Bindemittels zeigt einen deutlichen Einfluss auf die Verdichtbarkeit, sowohl bei der Marshallverdichtung als auch bei der Gyratorverdichtung.

#### 4.2.2 Indirekter Zugversuch ITT an Gyrator-Prüfkörpern

Die Prüfkörper aus der Gyratorverdichtung wurden für die Spaltzugprüfung verwendet. Es sollten Temperatur und Geschwindigkeit der Verformung variiert werden.

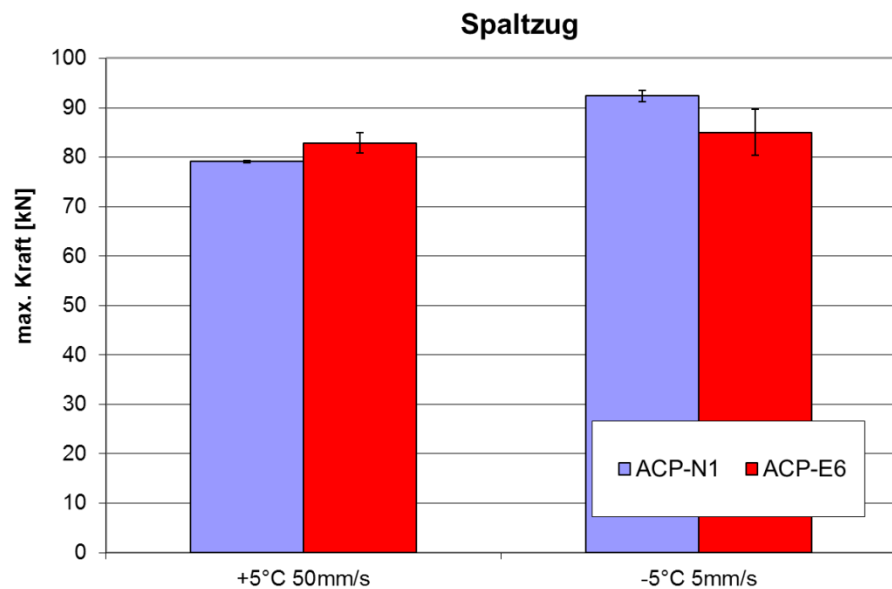


Abbildung 13: ITT-Prüfung bei verschiedenen Temperaturen und Prüfgeschwindigkeiten

Bei einer Temperatur von +5°C und einer Standard-Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min ergaben sich sehr ähnliche Werte für die Maximalkraft des indirekten Zugversuches. Bei einer Reduktion der Temperatur um 10°C auf -5°C wurde die Kapazität der 100 kN Prüfmaschine überschritten. Durch eine Anpassung der Prüfgeschwindigkeit auf 5 mm/min sanken die maximalen Kräfte unterhalb von 100 kN.

Interessanterweise kehrte sich dabei die Reihenfolge um. Bei -5°C ergab die Serie N1 und bei +5°C die Serie E6 höhere Werte. Die Streuung war aber bei der Serie ACP-E6 bei -5°C relativ hoch, was unter anderem auf die geringe Prüfkörperanzahl von 2 zurückzuführen ist.

Die Gyrator-Prüfkörper mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 100 mm sind für die Spaltzugprüfung bei Temperaturen unter 0°C zu gross, respektive die auftretenden Kräfte übersteigen die Kapazität der Prüfmaschine. Eine Reduktion der Prüfgeschwindigkeit ist auch keine Lösung, da die Differenzierung der beiden Serien zu klein ist. Deshalb wurde beschlossen, die Versuche mit kleineren Prüfkörpern (z.B. Marshall-Prüfkörpern) zu wiederholen.

### 4.2.3 Indirekter Zugversuch ITT mit Marshallprüfkörpern

*Tabelle 8: Resultate der Spaltzugprüfung bei +5°C*

	Hohlraumgehalt [Vol-%]	Maximale Kraft ITT [kN]
ACP-N1	6%	33.1
ACP-E6	14%	19.4

Da der Hohlraumgehalt der überhitzten Prüfkörper grösser ist, wurde zur Interpretation der Prüfergebnisse die maximale Kraft auf den hohlraumfreien Querschnitt bezogen. Dadurch soll berücksichtigt werden, dass durch den grösseren Hohlraumgehalt der für die Übertragung der Zugspannungen massgebende Querschnitt kleiner war.

$$\text{ACP-N1: } 33.1 \text{ kN} / 0.94 = 35.2 \text{ kN}$$

$$\text{ACO-E6: } 19.4 \text{ kN} / 0.86 = 22.6 \text{ kN}$$

Daraus kann abgeleitet werden, dass die Bruchkraft des Spaltzugversuches bei den nicht überhitzten Prüfkörper (ACP-N1) – unabhängig vom Hohlraumgehalt - deutlich grösser ist.

Die Prüfkörper für die Spaltzugprüfung wurden weniger stark verdichtet und zeigen deshalb einen höheren Hohlraumgehalt als bei der Marshallprüfung. Die maximale Kraft ist für den überhitzten Prüfkörper deutlich niedriger. Die Differenzierung ist ausreichend, könnte aber eventuell bei einer anderen Temperatur grösser sein.

### 4.2.4 Druckschwellversuch (DSV)

Das Mischgut wurde an der Empa hergestellt und ein Teil davon ans IMP geliefert, wo bei einer Verdichtungstemperatur von 150°C Marshallprüfkörper hergestellt wurden. Der DSV wurde gemäss [14] durchgeführt.

*Tabelle 9: Resultate des Druckschwellversuches bei 50°C (WP = Wendepunkt)*

	Steigung (WP) (‰)/10 <sup>4</sup> n	Dehnung im WP		Hohlraumgehalt Vol-%
		Mittelwert	Einzelwerte	
ACP-N1.2	1*	7*	2*/7*/11*	2.5
ACP-E6.2	1*	3*	3*/3*/4*	7.5

\*WP nicht erreicht; Werte bei 10'000 Zyklen

Die Unterschiede sowohl in der Steigung als auch der Dehnung sind nicht aussagekräftig, weshalb in einem nächsten Versuch die Prüftemperatur um 10°C auf 60°C erhöht wurde.

Tabelle 10: Resultate des Druckschwellversuches bei 50°C (WP = Wendepunkt)

	Steigung (WP)	Dehnung im WP		Hohlraumgehalt
		Mittelwert	Einzelwerte	
	(‰)/10 <sup>4</sup> n	‰	‰	Vol-%
ACP-N1.2	1*	15*	13/14/18	3.0
ACP-E6.2	1*	5*	5/5/6	8.2

\*WP nicht erreicht; Werte bei 10'000 Zyklen

Die Erhöhung der Prüftemperatur von 50 °C auf 60°C ergab eine etwas bessere Spreizung der Dehnung nach 10000 Zyklen (Abbildung 14). Die Steigung blieb hingegen unverändert bei 1, ohne dass der Wendepunkt erreicht wurde.

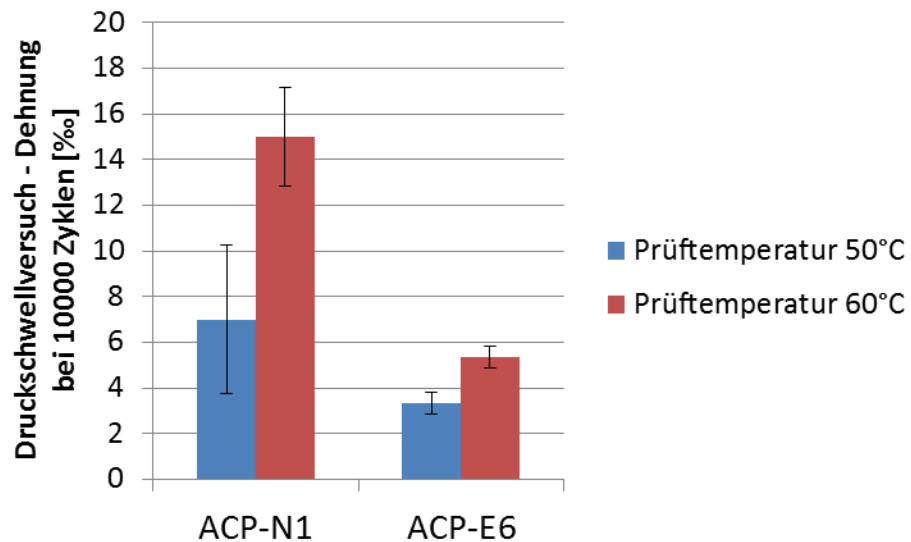


Abbildung 14: Druckschwellversuch mit unterschiedlichen Prüftemperaturen

### 4.3 Vorversuche 2 mit Asphaltbeton (Serie ACW)

Die Vorversuche der ersten Serie haben bei den tiefen Temperaturen nicht die erwarteten Resultate geliefert. Da bei dieser Serie ein plastomer-modifiziertes Polymerbitumen verwendet wurde, war nicht klar, ob die Ergebnisse von den üblicherweise schlechteren Kälteeigenschaften plastomer-modifizierter Bitumen beeinflusst wurde. Deshalb wurde beschlossen eine zweite Serie Vorversuche (ACW) mit dem elastomer-modifizierten Bindemittel PmB-A durchzuführen. Als Lagerungsbedingungen wurden wiederum die beiden Extremwerte N1 (Normalbedingung) und E6 (+ 40°C / 6h) gewählt.

*Tabelle 11: Prüfplan für den Asphaltbeton AC 8N (ACW)*

Prüfmethoden	Bedingungen
Marshall-Versuch	Verdichtungstemperatur 155°C, nach EN 12697-34 [28]
Indirekter Zugversuch	Prüftemperatur -15°C, -5°C, +5°C, nach EN 12697-23 [13]
Druckschwellversuch	Prüftemperatur 60°C, Durchmesser 150 mm nach TA StB, [14]
Gyratorverdichtung	100 mm Höhe, 150 mm Durchmesser [26]
Bindemittlrückgewinnung	
Rückgewonnenes Bindemittel	
Erweichungspunkt Ring und Kugel	nach EN 1427 [29]
Rückgewonnenes Bindemittel Penetration	nach EN 1426 [30]

#### 4.3.1 Gyratorverdichtung

Die Gyratorprüfkörper wurden bei einer Verdichtungstemperatur von 155°C an der Empa hergestellt. Als Zielhohlraumgehalt wurde wiederum der Marshall-Hohlraumgehalt der Serie N1 verwendet, der bei der Gyratorverdichtung nach 50 Umdrehungen erreicht wurde (Tabelle 12).

*Tabelle 12: Daten der Gyrator-Prüfkörper*

		ACW-N1		ACW-E6	
<b>Hohlraumgehalt</b>	Vol-%	4.2	1.2	5.1	1.2
<b>PK-Höhe</b>	mm	105.4	101.9	106.8	102
<b>Anzahl Umdrehungen</b>		50	204	50	204

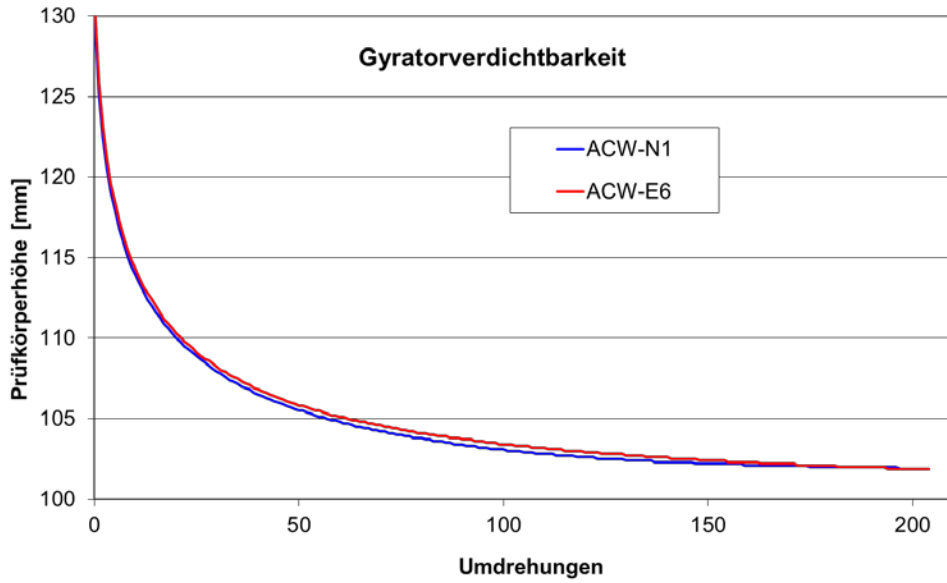


Abbildung 15: Vergleich der Verdichtbarkeit mit dem Gyrator

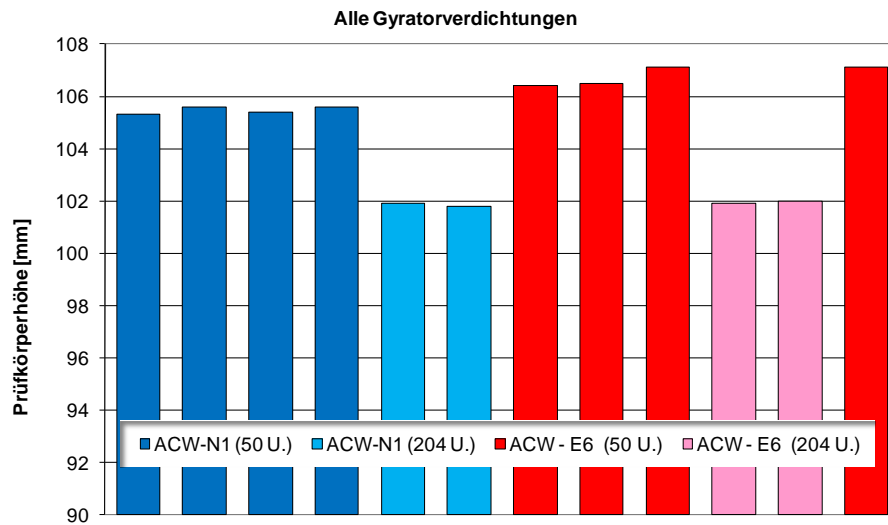


Abbildung 16: Endhöhe der Gyratorprüfkörper

Die Verdichtbarkeit der beiden Mischungen mittels Gyrator unterscheidet sich im Gegensatz zur Marshall-Verdichtung nur geringfügig (Abbildung 15) und die Verdichtungskurven der beiden Serien N1 und E6 sind beinahe deckungsgleich. Insbesondere nach maximaler Verdichtung mit 204 Gyrationen ist die Endhöhe der Prüfkörper identisch (Abbildung 16). Dies ist vermutlich auf die im Vergleich zur Schlagverdichtung höhere Verdichtungsenergie des Gyrators zurückzuführen. Nach 50 Umdrehungen sind die Prüfkörperhöhen der stärker gealterten Mischung im Mittel etwas grösser als die der wenig gealterten Mischung ACW-N1

### 4.3.2 Indirekter Zugversuch ITT (Spaltzug)

Tabelle 13: Resultate des indirekten Zugversuches an Marshallprüfkörpern

Prüftemperatur	Maximalkraft in kN		relative Standardabweichung	
	ACW-N1	ACW-E6	ACW-N1	ACW-E6
+5°C	43.7	41.5	2.3%	5.3%
-5°C	56.9	47.9	2.4%	3.5%
-15°C	62.4	49.0	3.4%	5.9%

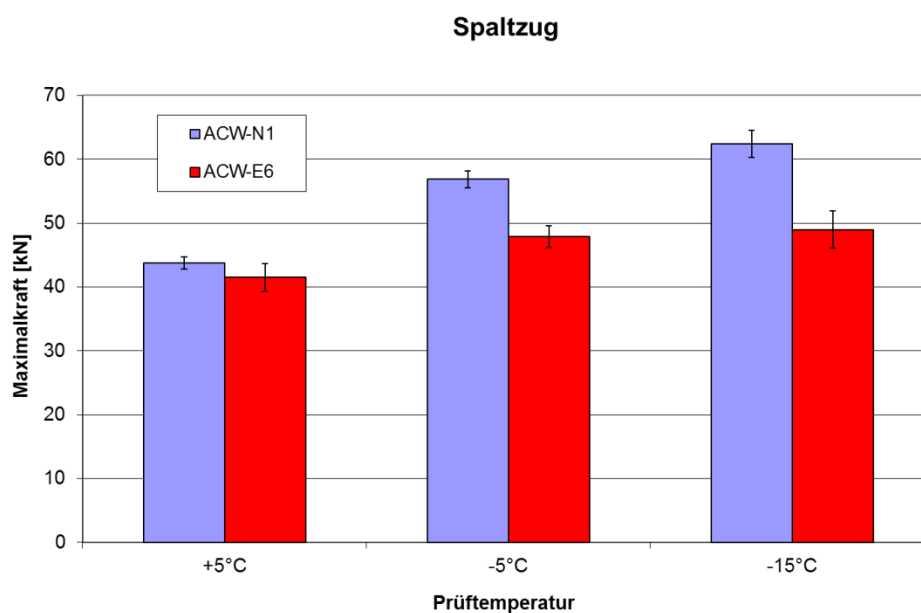


Abbildung 17: Resultate des indirekten Zugversuches an Marshall-Prüfkörpern

Wie erwartet sind die erforderlichen Kräfte für die Durchführung der Spaltzugprüfung mit Marshallprüfkörpern dank dem kleineren Durchmesser von 100 mm anstelle von 150 mm bei Gyratorprüfkörpern bei allen Temperaturen kleiner als 100 kN und somit kein Problem für die zur Verfügung stehende Universalprüfmaschine. Wie in Abbildung 17 ersichtlich, nimmt die Differenzierung mit abnehmender Prüftemperatur zu. So beträgt der Unterschied bei -15°C 12% des Mittelwertes, bei -5°C 10% und bei +5°C nur gerade 3%. Allerdings nimmt mit abnehmender Temperatur nicht nur der Unterschied sondern auch die Streuung zu. Deshalb wurde die Prüftemperatur auf -5°C festgelegt, wo eine gute Differenzierung bei gleichzeitiger akzeptabler Streuung erreicht wird.

### 4.3.3 Druckschwellversuch DSV

Die Prüfkörper wurden bei einer Verdichtungstemperatur von 155°C mit 50 Umdrehungen mit dem Gyrator an der Empa hergestellt und danach ans IMP geliefert.

*Tabelle 14: Resultate des Druckschwellversuches (WP = Wendepunkt)*

Prüfkörper	$k_W = \text{Steigung im WP}$	$\epsilon_W = \text{Dehnung im WP}$		$n_W = \text{Zyklen beim WP}$
	(‰)/10 <sup>4</sup> n	‰ Mittelwert	‰ Einzelwerte	‰ Mittelwert
ACW-N1	16	16	15/16/16	3650
ACW-E6	3	13*	12/14/14	*

Die Mischung ACW-N1 ist deutlicher weicher als die stärker gealterte Mischung E6, was sich in der grösseren Steigung im Wendepunkt ausdrückt, wobei dieser bei der Mischung ACW-E6 bei 10 000 Zyklen noch nicht erreicht wurde. Der Unterschied ist signifikant, ganz im Gegensatz zum Vorversuch 1 (Serie ACP), wo die Steigung nach 10000 Zyklen sowohl bei ACP-N1 und ACP-E6 identischen war (Steigung 1 ‰/10<sup>4</sup> n). Die Mischungen des Vorversuches 1 zeigten eine deutlich geringere Verformung als die der Serie ACW. Die Unterschiede der Dehnung im Wendepunkt ist hingegen bei der Mischung ACW nicht so deutlich. Ein weiteres Kriterium könnte auch die Anzahl Zyklen bis zum Wendepunkt darstellen, allerdings erhöht dies die Prüfdauer unter Umständen beträchtlich. Welches Kriterium schlussendlich eine bessere Aussage ergibt, ist daraus noch nicht ersichtlich. Die Prüftemperatur von 60°C scheint jedoch vernünftig zu sein.

### 4.3.4 Schlussfolgerungen zu den Prüfmethode

Mit dem modifizierten Druckschwellversuch bei 60°C und dem Spaltzug bei -5°C wurden zwei Prüfmethode gefunden, mit denen eine Überhitzung des Polymerbitumens nachgewiesen werden kann. Ob die Spreizung der Resultate ausreicht, um auch die Überhitzung bei nicht maximalen Lagerbedingungen aufzuzeigen sollte in den Hauptversuchen genauer betrachtet werden. Interessanterweise reagiert auch der Hohlraumgehalt Marshall recht empfindlich auf die Verhärtung des Bindemittels, im Gegensatz zur Gyratorverdichtung, wo kein markanter Unterschied in der Verdichtungskurve festzustellen war.

## 4.4 Hauptversuch mit Asphaltbeton (Serie ACX)

### 4.4.1 Mischgutherstellung

Für die Hauptversuche der Serie ACX wurde wie im Vorversuch ACW ein AC 8 N mit dem elastomer-modifizierten Polymerbitumen PmB-A verwendet. Die Chargengrösse betrug 15 – 30 kg.

Die Mischtemperatur für die Serie ACX-N wurde gemäss Angaben des Herstellers mit 170°C festgelegt. Bei dieser Temperatur erfolgte direkt danach die Lagerung in geschlossenen Kübeln während 1h (N1), 3h (N3) und 6h (N6). Daraus ergeben sich die entsprechenden Misch- und Lagertemperaturen von 210°C für die Serie ACX-E, dies entspricht 40°C über der empfohlenen Mischtemperatur.

### 4.4.2 Prüfmethode

Nach der Diskussion der Vorversuche wurde beschlossen die folgenden Prüfmethode anzuwenden.

*Tabelle 15 Prüfplan für den Asphaltbeton AC 8 N (ACX)*

Prüfmethode	Bedingungen
Marshall-Versuch	Verdichtungstemperatur 155°C, nach EN 12697-34 [28]
Indirekter Zugversuch	Prüftemperatur -5°C, nach EN 12697-23 [13]
4-Punkt-Biegung (Ermüdung)	10 Hz, 10°C [16]
Druckschwellversuch	Prüftemperatur 60°C, Durchmesser 150 mm nach TA StB, [14]
Bindemittel Erweichungspunkt Ring und Kugel	nach EN 1427 [29]
Bindemittel Penetration	nach EN 1426 [30]
Gyratorverdichtung	100 mm Höhe, 150 mm Durchmesser [26]

Der Marshall-Hohlraumgehalt reagiert empfindlicher auf die Bindemittelverhärtung als der Gyrator. Da jedoch der Gyrator für die Herstellung von Druckschwell-Prüfkörpern benötigt wird, wurde beschlossen, die Verdichtungskurven, die dabei erhalten werden, trotzdem zu analysieren. Für die Hochtemperatureigenschaften ergab der Druckschwellversuch bei 60°C die besten Resultate. Für die Tieftemperatureigenschaften wurde anstelle des KAST-Versuches, dessen Wiederholbarkeit ungenügend war, der indirekte Zugversuch bei -5°C gewählt. Zusätzlich zu den Prüfungen an Asphaltprüfkörpern wurden die Penetration und der Erweichungspunkt Ring und Kugel am zurückgewonnen Bindemittel bestimmt, um einen Anhaltspunkt über die Bindemittelverhärtung zu bekommen.

### 4.4.3 Marshallprüfung

Die Zunahme der Dauer der thermischen Belastung bei der Normaltemperatur von 170°C (Bezeichnung N1, N2, N3) führt zu einer markanten, kontinuierlichen Zunahme der Stabilität wobei der Hohlraumgehalt praktisch konstant bleibt. Bei der extremen thermischen Belastung (210°C; Bezeichnung E1, E2, E3) steigen sowohl Stabilität als auch der Hohlraumgehalt nach 3h an, nach 6h ist der Anstieg aber geringer, der Hohlraumgehalt bleibt sogar konstant nach 6h. Dies könnten Hinweise auf ein unterschiedliches Verhalten des Mischgutes bei einer thermischen Belastung bei 170 und 210°C sein. Der Fließwert nimmt bei beiden Serien ab, vor allem zwischen 3 und 6 Stunden, was auf eine Verhärtung des Bindemittels hinweist.

Tabelle 16: Ergebnisse der Marshallverdichtung und des Marshallversuches

Bezeichnung	Anzahl PK	Hohlraum-gehalt	Stabilität		Fliesen [mm]	
			Mittelwert	rel. Standardabw.	Mittelwert	rel. Standardabw.
ACX-N1	4	4.0%	12.7	1.2%	2.4	3.3%
ACX-N3	4	4.3%	14.2	1.1%	2.5	3.7%
ACX-N6	4	4.1%	18.0	2.5%	2.9	2.9%
ACX-E1	2	5.4%	14.3	0.8%	3.2	3.5%
ACX-E3	4	8.2%	16.5	2.0%	3	9.6%
ACX-E6	4	7.9%	18	2.1%	2.5	5.4%

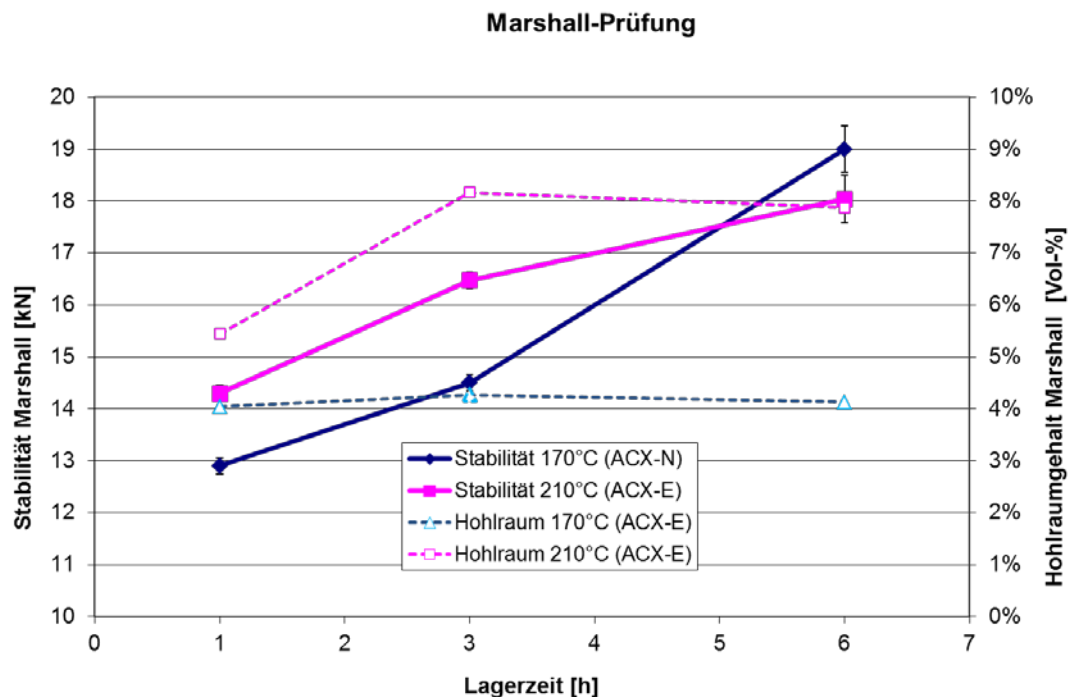


Abbildung 18: Resultate der Marshall-Prüfung

#### 4.4.4 Gyratorverdichtung

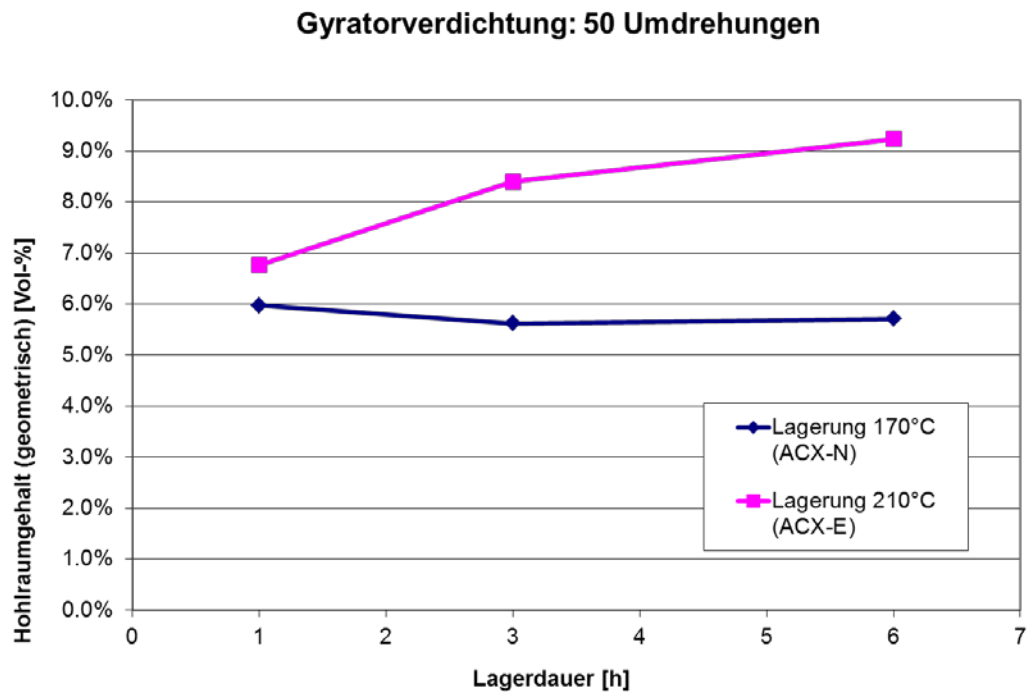


Abbildung 19: Prüfkörperhöhe nach Gyratorverdichtung mit 50 Umdrehungen

Der Hohlraumgehalt der im Gyrator verdichteten Prüfkörper zeigt bei der Lagertemperatur von 170°C einen ähnlichen Verlauf wie bei der Marshallverdichtung: Der Wert bleibt praktisch konstant, trotz massiv veränderter Lagerungsdauer. Der Hohlraumgehalt beim Marshall ist allerdings um 2 % tiefer, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass bei den Gyratorprüfkörpern der Hohlraum über die geometrische Raumdichte berechnet wurde.

#### 4.4.5 Bindemittelleigenschaften

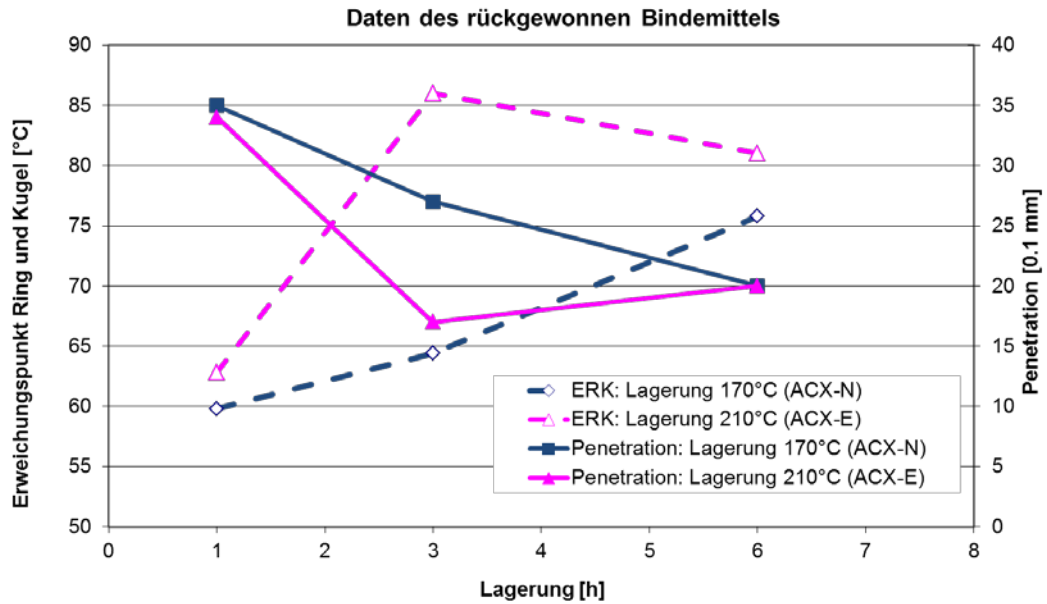


Abbildung 20: Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel am rückgewonnenen Bindemittel

Auch am rückgewonnen Bindemittel kann ein ähnlicher Trend erkannt werden. Bei der Lagerung von 210°C ist das Bindemittel nach 6 h Lagerung etwas weicher als jenes nach 3 h Lagerung und nicht härter, wie eigentlich zu erwarten gewesen wäre. Möglicherweise überlagern sich hier zwei Effekte mit entgegengesetzter Wirkung. Einerseits wird das Bindemittel durch eine zunehmende Versprödung härter. Andererseits tritt vor allem bei höheren Temperaturen ein Polymerabbau auf, der zu einer Erweichung des Bindemittels durch die Bildung von kürzeren Polymerfragmenten führt. Durch die niedrigere Viskosität des Bindemittels wird dementsprechend eine bessere Verdichtungen mit kleinerem Hohlraumgehalt erreicht, zudem erzeugt die niedrigere Viskosität des Bindemittels eine kleinere Marshallstabilität.

#### 4.4.6 Indirekter Zugversuch (ITT)

Tabelle 17: Resultate des indirekten Zugversuches an Marshallprüfkörpern

Bezeichnung	Maximalkraft [kN]		Spaltzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Mittelwert (3 PK)	rel. Standardabw.	Mittelwert (3 PK)	rel. Standardabw.
ACX-N1	57.5	3.9%	5.77	4.1%
ACX-N3	55.0	4.2%	5.53	4.4%
ACX-N6	52.5	2.7%	5.40	3.5%

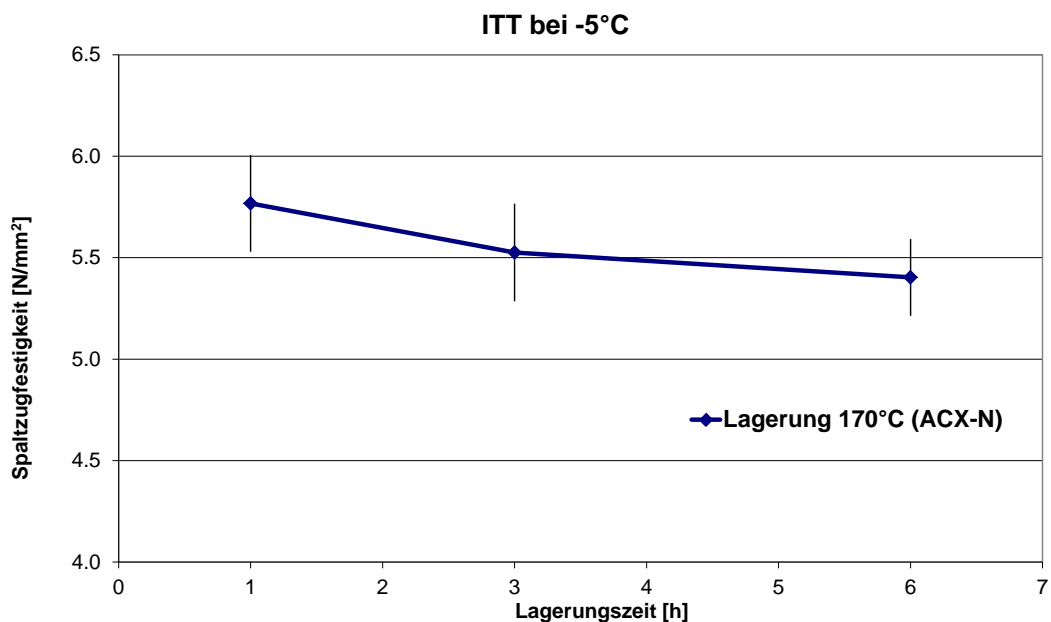


Abbildung 21: Spaltzugversuch bei -5°C, Lagertemperatur 170°C

Die Resultate des Spaltzugversuches ITT bei -5°C zeigen keine grossen Differenzierungen. Es ist ein schwacher Trend erkennbar, dass die Spaltzugfestigkeit mit zunehmender Lagerungszeit abnimmt, aber die Resultate liegen innerhalb der Fehlergrenze des Versuches und sind deshalb nicht sehr aussagekräftig. Deshalb wurde auf die Durchführung des ITT bei der Serie mit der Lagertemperatur 210°C (ACX-E) verzichtet.

### 4.4.7 Druckschwellversuch

Die Gyratorprüfkörper wurden bei einer Verdichtungstemperatur von 155°C an der EMPA hergestellt und danach ans IMP geliefert. Vortemperierung für DSV 2.5 Std bei 60°C.

Tabelle 18: Resultate des Druckschwellversuches (WP = Wendepunkt)

Prüfkörper	$k_W$ = Steigung im WP	$\epsilon_W$ = Dehnung im WP	$n_W$ = Zyklen beim WP
	(‰)/10 <sup>4</sup> n	(‰)	
ACX-N1	7	17	10000*
ACX-N3	9	14	5360
ACX-N6	13	16	4430

\* Wendepunkt nicht erreicht

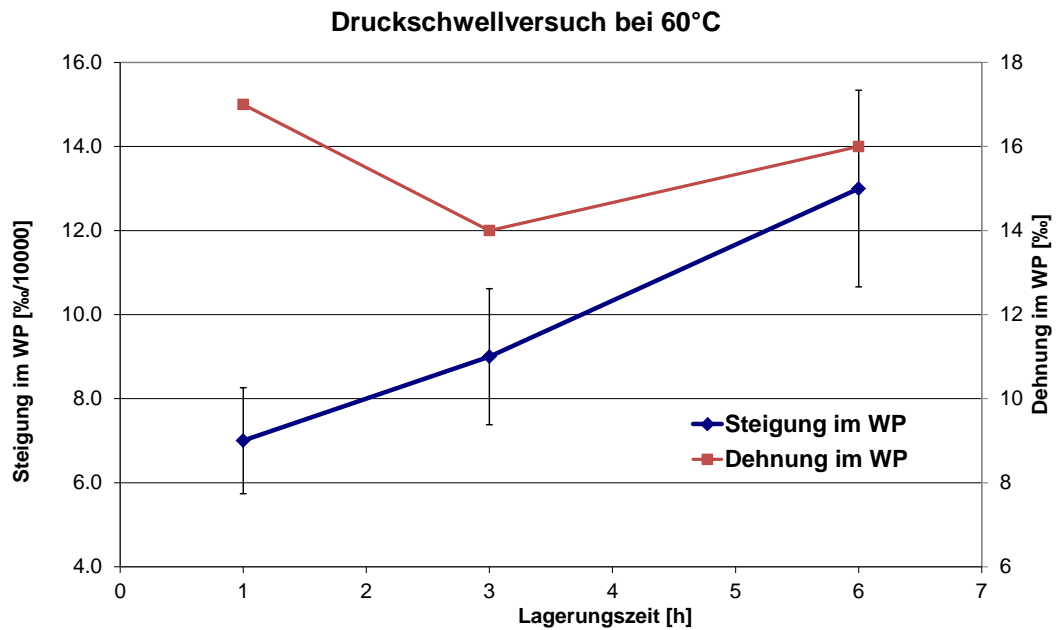


Abbildung 22: Druckschwellversuch bei einer Lagertemperatur von 170°C

Das Mischgut wird nicht wie erwartet mit zunehmender thermischer Belastung härter sondern weicher, was aus der zunehmenden Steigung im Wendepunkt ersichtlich ist. Allenfalls könnte dies ein Hinweis auf den Abbau von Polymeren geben, wodurch der elastische Anteil verloren geht und die plastische Verformung zunimmt.

#### 4.4.8 Ermüdungsprüfung mittels 4-Punkt-Biegung

Tabelle 19: Resultate der Ermüdungsprüfung mittels 4-Punkt-Biegung

Bezeichnung	Anfangsmodul [MPa]		Nf50 (extrapolierte Zyklenzahl bei 50% des Anfangsmoduls)	
	Mittelwert	rel. Standardabw.	Mittelwert	rel. Standardabw.
ACX-N1	9'380	*	12'976'000	*
ACX-N3	8'970	4%	5'980'000	9%
ACX-N6	8'850	2%	4'610'000	14%

\*Resultat von einem Prüfkörper

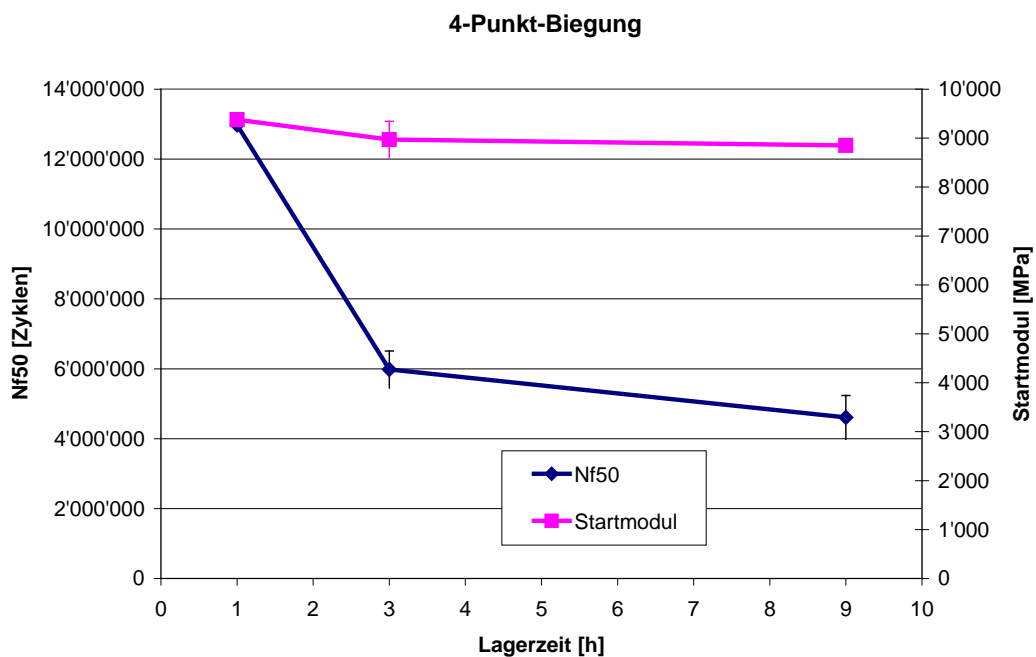


Abbildung 23: Ermüdungsprüfungen an der Serie ACX-N

Der Anfangsmodul ist weitgehend unabhängig von der thermischen Belastung und nimmt nur unmerklich ab. Die Anzahl Zyklen bis zum Versagen (Kriterium = 50% des Anfangsmoduls) nimmt hingegen deutlich ab nach einer thermischen Belastung von drei Stunden. Zwischen drei und sechs Stunden ist der Unterschied jedoch nicht so mehr so gross.

## 5 Diskussion und Schlussfolgerungen

### 5.1 Diskussion

Die mechanischen Prüfungen wurden an Mischgutproben durchgeführt, welche bei normgemässen Alterungsbedingungen:

- Asphalt-Beton 170 °C / 1 Std.
- Gussasphalt 220 °C / 1 Std.

und extremen Alterungsbedingungen beansprucht wurden:

- Asphalt-Beton 210 °C / 6 Std.
- Gussasphalt 265 °C / 6 Std.

Diese Lagerungsbedingungen treten in der Praxis normalerweise nicht auf, wurden jedoch bewusst gewählt, um die Sensibilität der mechanischen Prüfungen auf die Alterungsvorgänge anzusprechen.

Es wurden folgende mechanische Prüfungen durchgeführt:

#### **Asphalt-Beton:**

- Gyrator-Verdichtung
- Marshallverdichtung
- Spaltzugversuch an Gyratorprüfkörpern bei + 5 °C, -5 °C und -15°C
- Spaltzugversuch an Marshallkörper bei + 5°C
- Druckschwellversuch bei 50 °C und 60 °C
- Kast bei -15 bis +20 °C in Schritten von 5 °C

#### **Gussasphalt**

- Dynamische Eindringtiefe bei 50 °C und 60 °C
- Spaltzugversuch bei -5 °C

Zudem wurde das Bindemittel aus dem Mischgut rückgewonnen und untersucht; es wurde der Erweichungspunkt Ring und Kugel, die Penetration sowie eine Gelpermeationschromatographie durchgeführt.

Obwohl eine extreme Exposition des Mischgutes gewählt wurde und ein Abbau der Polymere in der GPC nachgewiesen werden konnte, zeigten die gewählten mechanischen Prüfmethoden keine signifikanten Unterschiede der mechanischen Eigenschaften. Auf der Basis dieser Erkenntnisse musste festgestellt werden, dass das Ziel des Forschungsprojektes nicht erreicht werden kann.

Die Untersuchungen an Gussasphalt und an Asphaltbeton haben gezeigt, dass verschiedene Faktoren die Eigenschaften der gealterten Prüfkörper bestimmen, die teilweise eine entgegengesetzte Wirkung zeigen.

- Erhöhung der Bitumensteifigkeit durch Erhöhung des Asphaltanteils.
- Reduktion der Bindemittelsteifigkeit durch thermische Zersetzung des Polymers. Durch den Abbau der langen Polymerketten verliert das Polymerbitumen nicht nur an Elastizität sondern führt auch zu einer Erniedrigung der Viskosität.
- Erhöhung der Steifigkeit der Prüfkörper durch erhöhten Fülleranteil (nur Gussasphalt).
- Erhöhung des Hohlraumgehaltes der Prüfkörper durch die Versteifung des Bindemittels, was einen negativen Einfluss auf viele Eigenschaften des Prüfkörpers hat wie beispielsweise Modul, Ermüdung, plastische Verformung, Wasserempfindlichkeit, etc.

Beim Gussasphalt wird durch die Lagerung im Gussasphaltkocher nicht nur das Bindemittel gealtert, was eigentlich die Absicht ist, sondern durch das konstante Rühren werden auch die Mineralstoffe geschädigt, wodurch sich der Feinanteil kontinuierlich erhöht. Das Rühren des Gussasphaltes ist aber notwendig, da sonst eine Entmischung des Gussasphaltes auftritt, was wiederum negative Folgen auf die Homogenität der Mischung und die daraus hergestellten Prüfkörper hätte. Die Erhöhung des Feinanteils kann nicht negiert werden, da sich dadurch der Mastixanteil erhöht, der die Eigenschaften der Prüfkörper massgebend beeinflusst. [19, 31].

Beim Walzasphalt stellen sich bezüglich des Polymerabbaus andere Probleme. Eine Veränderung der Bindemittelviskosität durch den Polymerabbau führt zu einem veränderten Verdichtungsverhalten des Mischgutes. Dies ist insbesondere bei der Marshallverdichtung zu beobachten. Überhitztes Bindemittel führte in den meisten Fällen zu einer schlechteren Verdichtbarkeit mit höherem Hohlraumgehalt der Prüfkörper, da das Bindemittel eine höhere Viskosität aufweist. Dies erschwert aber die Untersuchung solcher Prüfkörper mit anderen Prüfmethoden, da eine Verhärtung des Bindemittels einerseits zu einer Versteifung des Prüfkörpers führt, andererseits aber der grössere Hohlraumgehalt die Struktur schwächt. Diese beiden Einflussfaktoren sind schwierig voneinander zu trennen.

Ausserdem muss berücksichtigt werden, dass durch die thermische Belastung die Viskosität des Bindemittels nicht kontinuierlich zunimmt. Auch hier müssen zwei Haupteinflussparameter berücksichtigt werden. Als erstes reagiert das Bitumen im PmB mit dem Luftsauerstoff durch chemische und physikalische Reaktionen, das heisst die kleineren Moleküle der Maltenphase werden in grössere Asphaltene umgewandelt. Dies bewirkt eine Versteifung des Bitumens, was aus Alterungsversuchen an nicht modifiziertem Bitumen bekannt ist. Diese Reaktion findet auch in polymermodifizierten Bitumen statt, wenn auch argumentiert wird, dass durch die höhere Viskosität der PmB diese Umwandlung etwas langsamer verläuft.

Als zweites reagieren die Polymere im PmB mit dem Luftsauerstoff oder durch daraus gebildete reaktive Moleküle. Wie in Kapitel 1.2 diskutiert, wird die Doppelbindung der SBS angegriffen die auf unterschiedlich Weise reagieren kann. In vielen Fällen führt dies zu einer Spaltung der Polymerketten in kleinere Polymerfragmente, wie dies mittels GPC nachgewiesen werden kann. Die Grösse der Polymerkette hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Viskosität des Bindemittels. Je grösser die Polymerketten desto höher die Viskosität des Bindemittels. Der Polymerabbau führt deshalb zu einer Erniedrigung der

Bindemittelviskosität und wirkt der Verhärtung der Bitumenphase durch die Asphaltbildung entgegen [31]. Dieser Mechanismus ist sowohl bei Walzasphalt als auch bei Gussasphalt zu beobachten.

## 5.2 Schlussfolgerungen

Obwohl nicht alle vorgesehenen Mischguttypen und Bindemittel getestet wurden, kann aufgrund der bisherigen Resultate geschlossen werden, dass das angestrebte Ziel nicht erreicht werden kann, auch wenn das vollständige Prüfprogramm durchgeführt wird. Das Projektziel war die Überhitzung des Bindemittels direkt am Mischgut, resp. am Belag zu bestimmen und nicht am rückgewonnenen Bindemittel, wie dies bis anhin der Fall war.

Im Falle von Gussasphalt wurde mittels Gelpermeationschromatographie eindeutig nachgewiesen, dass die Polymere durch die thermische Belastung zu einem grossen Teil abgebaut werden. Der Einfluss des geschädigten Bindemittels ist jedoch nicht in allen Fällen im Gussasphaltbelag zu sehen.

Aus diesem Grund wurde entschieden das Forschungsprojekt abzubrechen und den Forschungskredit nicht vollständig auszuschöpfen.

Die Resultate und Schlussfolgerungen dieses Forschungsprojektes dürfen aber nicht dahingehend interpretiert werden, dass die Überhitzung von PmB unproblematisch ist oder dass die Qualität des Bindemittels vernachlässigbar ist. Untersuchungen am Bindemittel zeigen, dass die Struktur des PmB durch überhöhte Temperaturen und lange Lagerzeiten nachweislich geschädigt wird und die Eigenschaften des Belages beeinflusst. Durch die überlagernden Schadensmechanismen kann aber die Überhitzung des Bindemittels im Allgemeinen nicht durch Untersuchungen am Bohrkern nachgewiesen werden.

## 5.3 Weiterer Forschungsbedarf

Die Problematik des Polymerabbaus durch übermässige thermische Belastung ist nicht gelöst. Sie muss aber auf Stufe Bindemittel angegangen werden und nicht am Mischgut, respektive am eingebauten Belag. Problematisch ist insbesondere der Gussasphalt, der bei hohen Temperaturen hergestellt und verarbeitet wird. Teilweise ist das Polymer darin nur noch in abgebauter Form vorhanden und kann seine vorgesehene Funktion nicht erfüllen. Dies wird an relativ niedrigen Werten für die elastische Rückstellung beobachtet, die unter 50% liegen können [10]. Allerdings wird die Methode „Elastische Rückstellung“ nicht zu Unrecht in Frage gestellt, da auch qualitativ hochstehende polymermodifizierte Beläge ohne hohe elastische Rückstellung möglich sind.



# Anhänge

<b>I</b>	<b>Materialeigenschaften und Rohdaten .....</b>	<b>49</b>
I.1	Bindemittel .....	49
I.2	Mineralstoffe .....	50
I.3	Mischgut.....	57

# I Materialeigenschaften und Rohdaten

## I.1 Bindemittel

*Tabelle 20: Bindemittleigenschaften der vorausgewählten PmB*

		PMB-G	PmB-E	PmB-C	PmB-D	PmB-A	PmB-B
<b>Penetration</b>	0.1 mm	51	35	39	46	61	46
<b>ERK</b>	°C	68.5	65	61.4	75.6	57.0	61.8
<b>Brechkpunkt nach Fraass</b>	°C	-19	-17	-16	-18	-15	-22
<b>Elastische Rückstellung</b>	%	87	65	80	92	80	- (gerissen)
<b>Kraftduktilität</b>	J	2.7 (15°C)	n.b.	2.2 (15°C)	2.3 (15°C)	0.6 (15°C)	0.1 (25°C)

## I.2 Mineralstoffe

### I.2.1 Splitt RM 3105-08, -09

Fraktion 3/6 und 6/11

(an der Empa ausgesiebt in die Fraktionen 2.8/4, 4/5.6, 5.6/8, 8/11.2 )

Herkunft BAV Hard Volketswil

Datum der Untersuchung: 14.6.03

Prüflabor Empa 113, 135 (Petrografische Beschaffenheit 13.11.1998)

*Tabelle 21: Petrographie der Splittfraktionen*

Bezeichnung		RM 3105-08	RM 3105-09
Fraktion		3/6	6/11
Petrografische Beschreibung	Beurteilung	Zahl-%	
Granitoide, Gneise	hart	1.0	1.0
Quarzite	hart	4.0	2.0
Hornstein	hart	0.5	0.5
dichte Sandsteine	hart	38.5	45.5
Kieselkalke	hart	20.5	22.0
Dolomite	mittelhart	1.5	1.0
dichte, teilweise kieselige Kalke	mittelhart	12.0	12.5
sandige Kalke, kalkige Sande	mittelhart	22.0	14.5
weiche Sandsteine	weich	0.0	1.0
Petrografisch harte Körner		64.5	71.0
Petrografisch ungeeignete Körner		0.0	1.0
Anteil nicht-kubischer Körner		41.5	24.5
Anteil gebrochen		99	97.5

Tabelle 22: Eigenschaften der Splittfraktionen 3/6 und 6/11

		RM 3105-08	RM 3105-09
Fraktion		3/6	6/11
Prüfmethode		Zahl-%	
Los-Angeles-Versuch	LA-Koeffizient	16	13
Dichte	t/m <sup>3</sup>	2.70	2.70

Tabelle 23: Korngrößenverteilung der Splittfraktionen

Bezeichnung	RM3105-8B	RM3105-8A BAV	RM3105-9B BAV	RM3105-9A BAV
Fraktion	F2.8/4	F4/5.6	F5.6/8	F8/11
Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang [Masse-%]			
63.0	100.0	100.0	100.0	100.0
45.0	100.0	100.0	100.0	100.0
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0
22.4	100.0	100.0	100.0	100.0
16.0	100.0	100.0	100.0	100.0
11.2	100.0	100.0	100.0	98.5
8.0	100.0	100.0	100.0	18.2
5.6	99.8	100.0	4.3	0.1
4.0	99.4	20.5	0.0	0.0
2.8	33.6	0.3	0.0	0.0
2.0	0.8	0.1	0.0	0.0
1.0	0.2	0.1	0.0	0.0
0.500	0.2	0.1	0.0	0.0
0.250	0.2	0.1	0.0	0.0
0.125	0.2	0.1	0.0	0.0
0.090	0.2	0.1	0.0	0.0

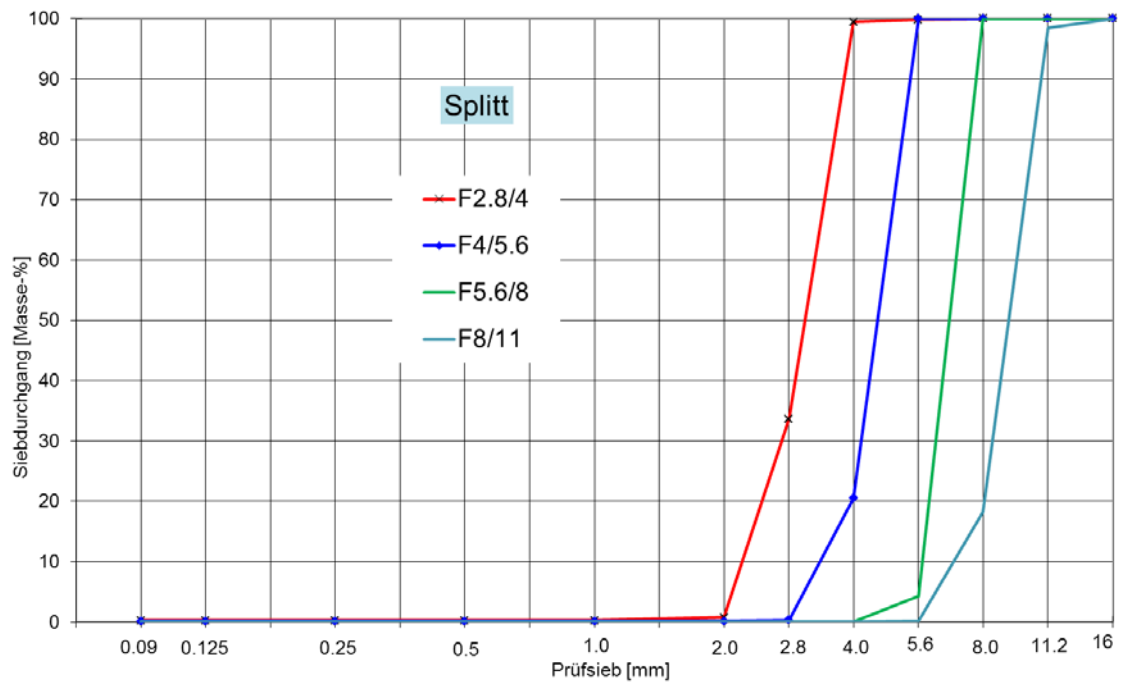


Abbildung 24: Korngrößenverteilung der Splittfraktionen

## I.2.2 Brechsand RM 3105-11

Fraktion 0/3

(an der Empa ausgesiebt in die Fraktionen 0.09/0.25, 0.25/0.5, 0.5/1, 1/2, 2/4)

Herkunft Wil ZH, Hastag Kies AG

Datum der Untersuchung: 14.6.03

Prüflabor Empa 113, LPM AG (Petrografische Beschaffenheit)

### Resultate

Rohdichte trocken 2.68 t/m<sup>3</sup> (bestimmt bei Frakt. 0/4)

*Tabelle 24: Korngrößenverteilung der Brechsandfraktionen*

Bezeichnung	RM3105-11	RM3105-11	RM3105-11	RM3105-11	RM3105-11
Fraktion	F0.09/0.25	F0.25/0.5	F0.5/1	F1/2	F2/4
Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang [Masse-%]				
63.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
45.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
22.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
16.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
11.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
8.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
5.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9
2.8	100.0	100.0	100.0	100.0	81.7
2.0	100.0	100.0	100.0	99.8	25.2
1.0	100.0	100.0	95.0	18.3	0.8
0.500	100.0	99.1	15.8	0.4	0.8
0.250	98.7	19.5	1.2	0.3	0.8
0.125	66.4	0.8	1.0	0.3	0.8
0.090	51.4	0.7	0.8	0.3	0.8

Tabelle 25: Petrographie des Brechsandes

Petrografische Beschreibung	Beurteilung	Zahl-%
Quarzite, Kristalline Gesteine	hart	35
Kieselkalke, Alpine Sandsteine	hart	30
Kalksteine	mittelhart	30
Kalkreiche Sandsteine	mittelhart	<5
Petrografisch ungeeignete Körner		<1
Anteil kubisch oder kugelig		ca. 75
Anteil gebrochen		>95

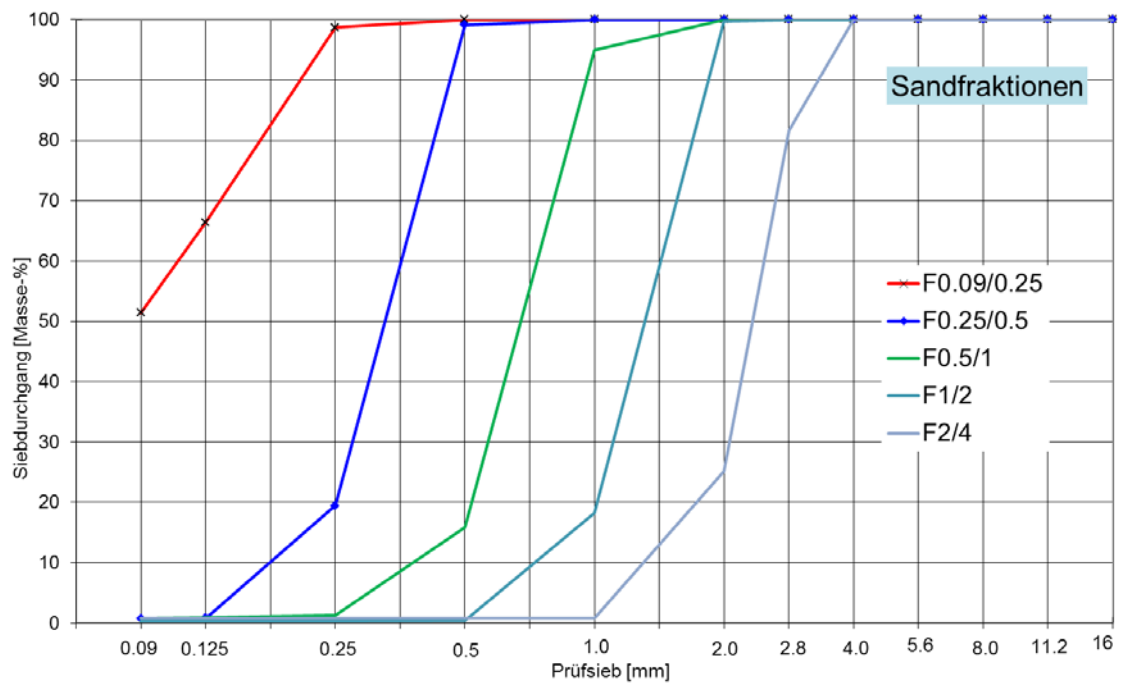


Abbildung 25: Korngrößenverteilung der Brechsandfraktionen

### I.2.3 Rundsand für Gussasphalt

Fraktion 1/4

Herkunft Gebenstorf, Merz AG

Datum der Untersuchung: 16.1.02

Prüflabor Empa, Abt. 135

Resultate

Rohdichte trocken 2618 kg/m<sup>3</sup> (bestimmt bei Frakt. 0/4)

---

*Tabelle 26: Korngrößenverteilung des Rundsandes*

---

Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang [Masse-%]
5.6	100
4.0	100
2.8	78
2.0	51
1.0	8
0.500	0

---

*Tabelle 27: Petrographie des Rundsandes 0/4*


---

<b>Petrografische Beschreibung</b>	<b>Beurteilung</b>	<b>Zahl-%</b>
Granitoide, Gneise	hart	5.0
Quarzite	hart	7.5
dichte Sandsteine	hart	43.5
Kieselkalke	hart	11.0
dichte, teilweise kieselige Kalke	mittelhart	16.3
sandige Kalke, kalkige Sande	mittelhart	17.0
Petrografisch ungeeignete Körner		0.0

## I.2.4 Kalkfüller Istein

Probe 03-00777-001.

---

*Tabelle 28: Korngrößenverteilung des Kalkfüllers*


---

<b>Prüfsieb [mm]</b>	<b>Siebdurchgang [Masse-%]</b>
1.0	100
0.500	99.8
0.25	98.8
0.125	94.4
0.09	88.2

## I.3 Mischgut

### I.3.1 Gussasphalt

*Tabelle 29: Optimiertes Mischrezept für Gussasphalt MA 8*

<b>IMP-Nr</b>	<b>Fraktion</b>	<b>Provenienz</b>	<b>Masse-%</b>
3-777-1	Füller	Istein	25.0
3-1283-1	BS 0.09 / 0.25	Wil	2.3
3-1283-2	BS 0.25 / 0.5	Wil	3.2
3-1283-3	BS 0.5 / 1	Wil	3.7
3-1283-4	BS 1/2	Wil	4.6
3-1283-5	BS 2/4	Wil	5.6
3-1283-9	RS 0/1	Gebenstorf	9.3
3-1283-10	RS 1/4	Gebenstorf	10.2
3-1283-6	Splitt 4/5.6	BAV Volketswil	14.8
3-1283-7	Splitt 5.6/18	BAV Volketswil	7.4
3-1283-8	Splitt 8/11	BAV Volketswil	6.5
3-734-1	PmB-D	BAV Volketswil	7.5
		Total	100

### I.3.2 Walzasphalt Mischgut Serie ACP (Vorversuch 1)

*Tabelle 30: Korngrößenverteilung des Mischgutes ACP*

Bezeichnung	Massenanteil [M-%]
Fraktion 8/11	1%
Fraktion 5.6/8	8%
Fraktion 4/5.6	13%
Fraktion 2/4	7%
Fraktion 2.8/4	11%
Fraktion 1/2	15%
Fraktion 0.5/1	14%
Fraktion 0.25/0.5	5%
Fraktion 0.09/0.25	15%
Füller	4%
PmB-B	6.2%

*Tabelle 31: Resultate der Mischgutuntersuchungen der Vorversuche*

	Masse-%	ACP-N1	ACP-E6
Lösliche Bindemittelanteile	t·m <sup>-3</sup>	5.84	5.76
Dichte Mischgut	t·m <sup>-3</sup>	2.462	2.457
Rohdichte	Vol-%	2.401	2.360
Hohlraumgehalt	Vol-%	2.5	4.0
<b>Hohlraumgehalt bindemittelfrei</b>			
HMM	%	16.2	17.3
Hohlraumfüllungsgrad HFB	kN	84.7	77.1
Marshall Stabilität, korrigiert	mm	11.6	13.5

### I.3.3 Walzasphalt Mischgut Serie ACW (Vorversuch 2)

Tabelle 32: Optimierte Mischung AC8N [27]

Mischung	Einheit	ACW-N1	ACW-E6	Sollwert AC 8 N/S
Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	5.96	5.90	≥6.0*
Rohdichte bestimmt	kg·m <sup>3</sup>	2446	2446	-
Raumdichte SSD	kg·m <sup>3</sup>	2346	2282	-
Hohlraumgehalt	Vol-%	4.1	6.7	2...5
Hohlraumgehalt bindemittelfrei VMA	Vol-%	17.7	19.8	-
Hohlraumfüllungsgrad FVB	Vol-%	76.9	66.2	≤83
Marshall Stabilität, korrigiert	kN	12.2	n.b.	≥7.5
Marshall Fliesen	mm	2.7	n.b.	2..4

(\* dosiert, n.b. nicht bestimmt)

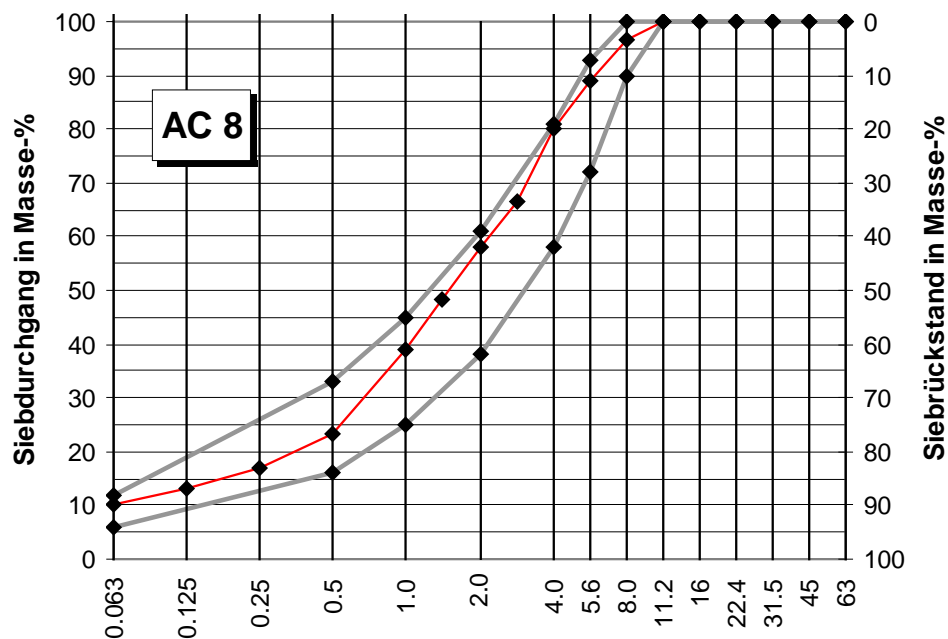


Abbildung 26: Korngrossenverteilung des optimierten AC8N der Serie ACW

### I.3.4 Walzasphalt Mischgut Serie ACX

*Tabelle 33: Mischrezept für den Asphaltbeton AC 8N (ACX)*

Bezeichnung	Massenanteil [M-%]
Fraktion 8/11	3%
Fraktion 5.6/8	8%
Fraktion 4/5.6	11%
Fraktion 2/4	7%
Fraktion 2.8/4	12%
Fraktion 1/2	20%
Fraktion 0.5/1	14%
Fraktion 0.25/0.5	5%
Fraktion 0.09/0.25	7%
Füller	6%
PmB-A	6.2%

*Tabelle 34: Resultate der Mischgutuntersuchungen der Vorversuche 2*

		ACX-N1	ACX-N3	ACX-N6	ACX-E1	ACX-E3	ACX-E6
<b>Dichte Mischgut *</b>	kg/m <sup>3</sup>	2446	2446	2446	2446	2446	2446
<b>Raumdichte</b>	kg/m <sup>3</sup>	2347	2342	2345	2313	2246	2253
<b>Hohlraumgehalt</b>	Vol-%	4.0	4.3	4.1	5.4	8.2	7.9
<b>Marshall Stabilität, korrigiert</b>	kN	12.9	14.5	19.0	14.3	16.5	18.0
<b>Marshall Fliessen</b>	mm	2.4	2.5	2.9	3.2	3.0	2.5
<b>Prüfungen am rückgewonnenen Bindemittel</b>							
<b>Penetration</b>	0.1mm	35	27	20	34	17	20
<b>Erweichungspunkt Ring und Kugel</b>	°C	59.8	64.4	75.8	62.8	86	81

## Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AC	Asphaltbeton (Asphalt concrete)
ACP, ACW, ACX	Prüfserien mit Asphaltbeton
DATEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DETEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DSV	Druckschwellversuch
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
ERK	Erweichungspunkt Ring und Kugel
ET-dyn	Dynamische Eindringtiefe
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometrie
GPC	Gelpermeationschromatographie
IMP	IMP Bautest AG, Institut für Materialprüfung
ITT	Indirekter Zugversuch
KAST	Ko-Axialer-Schubtest
LA-Koeffizient	Los Angeles-Koeffizient
MA	Gussasphalt (Mastic asphalt)
PA	Drainasphalt (Porous asphalt)
PK	Prüfkörper
PmB	Polymerbitumen
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Blockpolymer
UVEC	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
WP	Wendepunkt
ZET dyn	Zunahme der dynamische Eindringtiefe ETdyn zwischen 2500 und 5000 Zyklen



## Literaturverzeichnis

- 1 Hugener, M., *Funktionsstabilität von Polymerbitumen*. Strasse und Verkehr, (4), 1995, p. 160-166.
- 2 Collidin, Y. and e. al. Relations entre les proprietes des bitumes modifiés aux polymers et les produits d'étanchéité ou le matériaux pour la construction routière – Thème 2: in Séminaire scientifique RILE; sur la formulation, le controle et le comportement des bitumen modifiés aux polymers soit pour les étanchéités soit pour la constrction routière. Dubrovnik – Septembre 1988 (March 1989).
3. Damm, K.W. and R. Haenichen, Brückenbeläge aus Gussasphalt mit Trinidad Naturasphalt und polymermodifiziertem Bitumen. Trinidad Naturasphalt, 1995. SONDERHEFT(33 - 37).
4. Schellenberg, K., Gussasphalt auf Brücken, Parkdecks und anderen Verkehrsflächen. Asphaltstrasse, 1991. 25(1): p. 23-8.
5. Hesp, S., H. Cai, and D. Thom. LOW-TEMPERATURE PERFORMANCE TESTING OF POLYMER MODIFIED ASPHALT CONCRETE. in 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. 2000. Barcelona: Book 1, 320-326.
6. Valdés-Hevia, T.C., D.A. Pérez, and C.J. Sánchez. LABORATORY STUDY OF POLYMER MODIFIED BITUMEN AGEING. in 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. 2000. Barcelona: Book 1, 1-8.
7. Verhasselt, A. and A. Vanelstraet. LONG-TERM AGEING - COMPARISON BETWEEN PAV AND RCAT AGEING TESTS. in 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. 2000. Barcelona: Book 1, 897.
- 8 Tan, K. T., C. C. White, et al. (2008). "Evaluating aging of coatings and sealants: Mechanisms." *Polymer Degradation and Stability* 93(3): 648-656.
- 9 Ruan, Y., R. R. Davison, et al. (2003). "Oxidation and Viscosity Hardening of Polymer-Modified Asphalts." *Energy & Fuels* 17(4): 991-998.
- 10 Roos, R., Karsten, C., „Zusammenhang des Wertes für die elastische Rückstellung von zurückgewonnenem Polymermodifiziertem Bindemittel und den Gebrauchseigenschaften des Asphaltmischgutes zur Schaffung eines Bewertungsmassstabes“, FE-Vorhaben 07.213/2006/EGB; Karlsruhe März 2009
- 11 SN 670210a-NA EN 14023:2005 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen
- 12 K. D. Younger, M. N. Partl, H. W. Fritz, R. Gubler, Asphalt concrete shear testing with the co-axial shear tester at Empa in *Mechanical Tests for Bituminous Materials*, Ed. H. Di Benedetto, L. Francken, Proceedings of th fifth international RILEM Symposium MTBM Lyon, France, 14-16 May 1997 p 189-195.
13. EN 12697-23:2003 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäi-

- sches Komitee für Normung) 2003.
- 14 TP A-StB Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Strassenbau - Teil: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsgruppe "Asphaltstrassen" 1999.
  - 15 TP A-StB Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Strassenbau - Teil: Dynamische Eindringversuch mit ebenem Stempel an Gussasphalt, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsgruppe "Asphaltstrassen" 2003.
  - 16 EN 12697-24 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung
  - 17 Gubler R., Angst Ch Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut, Grundlagen für eine Anforderungsnorm; FA 20/99
  - 18 Di Benedetto, H., Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution, Ed. M.N. Partl, 1993, RILEM Publications SARL. p. 15-38.
  - 19 Angst Ch, Schellenberg K. „Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt“, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen, 2008, Bericht Nr.1248.
  - 20 Empa-Methode SOP 3025 Polymeranalyse mittels GPC, 1998.
  - 21 P.W.Jennings, A perspective on asphalt chemistry research an the use of HP-GPC analysis. Fuel Science and Technology Int'l., 1989: p. 7.
  - 22 Brulé, B., Contribution of Gel Permeation Chromatography (GPC) to the characterization of asphalts. Liquid chromatography of Polymers and Related Materials III, Chromatographic Science Series, 1980. 13: p. 215.
  - 23 Raab, C., M.N. Partl, and M. Hugener, *Untersuchung thermischer Schäden eines polymermodifizierten Strassenbelags*. Strasse und Verkehr, 12, 1994, p. 618.
  - 24 Rubach K, Determination of the void content of mineral aggregate for gussasphalt in a given state of compaction in order to estimate excess binder content; unpublished thesis; Institute für Highways Brunswick Technical University, 1989
  - 25 EN 12697-30 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät
  26. ASTM D6925-03 Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor, American Society for Testing and Materials (ASTM) 2003.
  - 27 SN 640 431-1: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbe-

ton, VSS.

- 28 EN 12697-34 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 34: Marshall-Prüfung
29. EN 1427 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Erweichungspunktes - Ring und Kugel-Verfahren, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2007.
- 30 EN 1426 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2007.
- 31 Determination of the void content of mineral aggregate for gussasphalt in a given state of compaction in order to estimate excess binder content; unpublished thesis; Institute für Highways Brunswick Technical University, 1989
- 32 Xu, J., A. Zhang, et al. (2007). "A study on thermal oxidation mechanism of styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS)." *Polymer Degradation and Stability* 92(9): 1682-1691.

# 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

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 3.5.2012

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2001/452  
 Projekttitel: Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen  
 Enddatum: 30.4.2011

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Resultate der Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verhärtung des Bindemittels durch Überhitzung bei der Herstellung nicht eindeutig an Bohrkernen nachgewiesen werden kann ohne das Bindemittel zu extrahieren. Mehrere verschiedene Einflussfaktoren auf die Mischguteigenschaften überlagern sich. So wurde beobachtet, dass beim Rühren des Labor-Gussasphaltes im Gussasphaltkocher durch Abrieb grössere Mengen an Feinanteilen entstehen, die zu einer übermässigen Verhärtung des Mörtels führen. Diese ist unabhängig von der Lagertemperatur und wird alleine durch die Kochzeit beeinflusst, was durch die Bestimmung des Fülleranteils nachgewiesen wurde. Beim Walzasphalt bewirkt eine erhöhte thermische Belastung zuerst eine Verhärtung des Bindemittels was mit in einer erhöhten Marshallstabilität oder höheren Werten beim Druckschwellversuch einhergeht. Eine weitere Verhärtung des Bindemittels beeinflusst jedoch auch die Verdichtbarkeit, die abnimmt während der Hohlraumgehalt parallel dazu steigt. Dies führt schliesslich wieder zu einer Abnahme der Marshallstabilität, so dass Rückschlüsse daraus nicht eindeutig sind. Aus diesen Gründen wurde das Forschungsprojekt frühzeitig abgebrochen, da weitere Prüfungen an zusätzlichen Mischguttypen keine anderen Resultate hervorgebracht hätten. Deshalb wurden die vorgesehenen Untersuchungen am offenporigem Asphalt nicht durchgeführt.

Dieses Forschungsprojekt hat gezeigt, dass aus den mechanischen Eigenschaften einer Belagsschicht nicht auf eine Überhitzung geschlossen werden kann, auch wenn Sollwerte aus der Erstprüfung vorhanden wären, da sich wie erwähnt verschiedene Effekte überlagern.

Zielerreichung:

Das Projekt wurde abgebrochen und die Mittel nicht vollständig ausgeschöpft, da aus den erhaltenen Resultaten geschlossen werden musste, dass das gesetzte Ziel nicht erreicht werden kann. Die Überlagerung verschiedener Einflussfaktoren auf die Alterung des PmB führen zu unterschiedlichen Einflüssen auf die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper, die sich teilweise gegenseitig aufheben, so dass keine eindeutige Beurteilung des Alterungszustandes erfolgen kann.

Aus diesem Grund wurde der offenporige Belag nicht mehr hergestellt und gewisse Prüfungen nicht mehr durchgeführt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Problematik des Polymerabbaus durch übermässige thermische Belastung ist nicht gelöst. Sie muss aber auf Stufe Bindemittel angegangen werden und nicht am Mischgut, respektive am eingebauten Belag. Problematisch ist insbesondere der Gussasphalt, der bei hohen Temperaturen hergestellt und verarbeitet wird. Teilweise ist das Polymer darin nur noch in abgebauter Form vorhanden und kann seine vorgesehene Funktion nicht erfüllen. Dies wird an relativ niedrigen Werten für die elastische Rückstellung beobachtet, die unter 50% liegen können. Allerdings wird die Methode „Elastische Rückstellung“ nicht zu Unrecht in Frage gestellt, da auch qualitativ hochstehende polymermodifizierte Beläge ohne hohe elastische Rückstellung möglich sind.

Publikationen:

keine

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Hugener

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Empa Dübendorf, Abteilung Strassenbau/Abdichtungen

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

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es nicht möglich ist, am Bohrkern eine Versprödung des Bindemittels durch Überhitzung bei Herstellung, Transport und Einbau eindeutig nachzuweisen ohne das Bindemittel zu extrahieren. Deshalb wurde das Projekt abgebrochen.

Im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse kamen Zweifel auf bezüglich der Aussagekraft des Druckschwellversuchs (DSV). Dieser beruhte aber hauptsächlich auf einer Verwirrung aufgrund von unterschiedlichen DSV-Varianten, die in deutschen und europäischen Normen aufgeführt werden. Im Forschungsprojekt wurde aber das ursprünglich in Deutschland entwickelte DSV-Verfahren angewandt, für das in Deutschland jahrelange Erfahrungen sowie Anforderungen vorliegen. Ausserdem sind die Ergebnisse des DSV alleine nicht relevant für die Schlussfolgerungen dieses Projektes.

Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Forschung ist, dass Temperatur und Mischdauer vor allem bei der Aufbereitung von MA eine grosse Rolle spielen. Hohe Temperaturen und langer Mischdauer zerstören den Kunststoff. Andererseits erhöht sich der Füllergehalt im Mischgut durch Abrieb des Gesteins. Interessanterweise heben sich beide Vorgänge mindestens teilweise auf, so dass auch nach thermischer und mechanischer Überbeanspruchung nicht unbedingt Änderungen in der Stabilität des Mischgutes festgestellt werden können.

##### Umsetzung:

Bei der Mischgutproduktion sind der Temperaturen und den Mischzeiten hohe Aufmerksamkeit zu schenken. Die gegenwärtige Kontrolle des Mischgutes auf der Baustelle ist ungenügend.

Es hat sich gezeigt, dass nicht auf Bindemitteluntersuchungen verzichtet werden kann. In einem weiteren Forschungsbericht wurde inzwischen nachgewiesen, dass sich die Eigenschaften eines PmB durch die Extraktion nicht ändern. Der Nachweis einer Schädigung des Bindemittels ist so also möglich.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Die Versteifung des MA durch den zunehmenden Füllergehalt wurde im Labor festgestellt. Dies sollte in der Praxis im Massstab 1:1 überprüft werden.

Eine aussagekräftige Variante des DSV ist bezüglich Aussagekraft zu überprüfen und in der Schweiz einzuführen.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Es sind Anforderungswerte für das auf der Baustelle angelieferte Mischgut zu definieren und vorzuschreiben, insbesondere an das rückgewonnene Bindemittel.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: van den Berg

Vorname: Marinus

Amt, Firma, Institut: Privat

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht Rapport Nr./ No	Fachliche Begleitung Suivi techn.	Auftrag Mandat Nr./ No	Titel (Sprache des Berichts) / Titre (langue du rapport) <i>Titel (Übersetzung) / Titre (traduction)</i>	Jahr Année
1343	VSS	2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</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>	2011
1345	SVI	2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen Application areas of various means of transportation in agglomerations	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>	2010
1347	VSS	2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen <i>Capacité des installations de stationnement</i>	2010
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>	2011
1349	VSS	2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i>	2011
1350	VSS	2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i>	2011
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>	2011
1352	VSS	2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i>	2011
1353	VSS	2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr <i>Bases pour trafic piétonnier</i>	2011
1354	VSS	2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen <i>Disposition, aménagement et exécution des escaliers, rampes et rampes à gradins</i>	2011
1355	FGU	2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang 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>	2011
1356	SVI	2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i>	2011
1357	SVI	2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? <i>Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How Do Drivers Behave in Cars?</i>	2012
1358	SVI	2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen Raccordement des installations de loisirs au réseau de transports	2012
1359	SVI	2004/003	Wissens- und Technologietransfer im Verkehrsbereich <i>Know-how and technology transfer in the transport sector</i>	2012
1360	VSS	2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel <i>Acoustical guidance in road tunnels</i>	2012
1361	SVI	2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung <i>Approches innovantes de la gestion du stationnement</i>	2011
1362	SVI	2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Activity oriented analysis of induced travel demand</i>	2012
1363	VSS	2007/907	Verkehrsprognosen mit Online-Daten <i>Pronostics de trafic avec des données en temps réel</i>	2011
1364	SVI	2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft <i>La régulation du trafic marchandises suisse en tant qu'objet de recherche</i>	2012

Bericht Rapport Nr./N°	Fachliche Begleitung Suivi techn.	Auftrag Mandat Nr./N°	Titel (Sprache des Berichts) / Titre (langue du rapport) <i>Titel (Übersetzung) / Titre (traduction)</i>	Jahr Année
1365	SVI	2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1366	VSS	2005/702	<i>De nouvelles découvertes sur le comportement de mobilité par Data Mining?</i> Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1367	VSS	2005/801	<i>Vérification des bases d'évaluation pour l'appréciation de l'adhérence des chaussées</i> Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1373	VSS	2008/204	<i>Principes de bases concernant la conception, la construction et la durabilité de voies de raccordement</i> Gains de sécurité routière résultant de datapooling et analyses structurées de données	2012
1374	FGU	2004/003	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung <i>D'uniformisation de l'éclairage dans les tunnels</i>	2012
1375	VSS	2008/304	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB <i>Développement d'une méthode d'essais non-déstructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité</i>	2012
1376	ASTRA	2011/008	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen <i>Signalisations dynamiques sur des routes principales</i>	2012
1377	VSS	2009/302	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau <i>Expériences dans la construction de ponts en Suisse</i>	2012
1378	SVI	2004/053	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen <i>(Road Safety Inspection)</i> <i>Inspection de sécurité routière des itinéraires</i>	2012
1379	VSS	2010/206	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen? <i>Plus de sécurité grâce aux chaussées à voie centrale banalisée?</i> Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1380	ASTRA	2007/009	<i>Harmonisation of procedures and user interface in Tunnel-Process Control Systems</i> Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1381	SVI	2004/055	<i>Mode of action and potential of combined mobility</i> Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1382	VSS	2001/504	<i>Bénéfices liés à une réduction des temps de parcours du trafic voyageur</i> Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1383	FGU	2008/005	<i>Optimisation de l'indentation statique pour l'évaluation des asphaltes coulés dures</i> Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1384	VSS	1999/249	<i>Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg</i> Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1385	VSS	2004/703	<i>Interfaces conceptuelles entre les bases de données GEC, GEO et GEI</i> Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1386	VSS	2006/204	<i>Grundlagen zur Revision der Normen über die Messung und Beurteilung der Fahrbahnebenheit</i> Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1387	VSS	2010/205	<i>Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art</i> Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1389	FGU	2003/002	<i>Data storage in tunnel process control systems</i> Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1390	FGU	2008/004	<i>Comportement à long terme des tunnels des routes nationales</i> Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1391	ASTRA	2011/003	<i>Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Belchen</i> Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1392	ASTRA	2008/008	<i>Concept ITS-CH transport terrestre 2025/30</i> FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012

Bericht Rapport Nr./N°	Fachliche Begleitung Suivi techn.	Auftrag Mandat Nr./N°	Titel (Sprache des Berichts) / Titre (langue du rapport) <i>Titel (Übersetzung) / Titre (traduction)</i>	Jahr Année
1394	VSS	2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte <i>Base des concepts d'exploitation en matière de trafic</i>	2012
1395	FGU	2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau <i>KarstALEA: Instructions pratiques pour la prévision des dangers liés au karst lors de travaux souterrains</i>	2012
1396	VSS	1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut <i>Influence du taux d'enrobage des granulats minéraux sur les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux</i>	2012
1397	FGU	2008/003	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik <i>Protection contre les incendie dans les tunnels: Niveau de protection et estimation de la charge d'incendie - Phase 1: État de la technique</i>	2012
1398	ASTRA	2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria <i>Umweltfussabdruck von Schwerverkehrsfahrzeugen Phase III: Vergleich von Footprint und Schwerverkehrsabgabe (LSVA) Kriterien</i>	2012
1399	VSS	2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung <i>Améliorer la sécurité routière par des récompenses</i>	2012
1400	VSS	2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme <i>Vegetated support grid embankment systems</i>	2012
1402	VSS	2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen <i>Résistance au vieillissement climatique et poinçonnement des géosynthétiques</i>	2012
1403	SVI	2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen <i>Coordination between traffic control systems of the motorway network (HLS) and secondary transport network (HVS)</i>	2012
1404	VSS	2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen <i>Validation de l'évaluation coûts-avantages des mesures d'entretien routier</i>	2012
1407	ASTRA	2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière: FUSAIN <i>Fusion der Indikatoren für Verkehrssicherheit: FUSAIN</i>	2012
1408	VSS	2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire <i>Thermische Alterung von Asphalt im Labor</i>	2012