



Zusammenhang zwischen Bindemiteleigenschaften und Schadensbildern des Belages? – (Performance-orientierte Methoden)

**Relation between binder properties and damage
characteristics of pavements? (Performance orientated
methods)**

**Empa Dübendorf, Strassenbau/Abdichtungen
Dr. Martin Hugener**

**Forschungsauftrag VSS 1999/131 auf Antrag der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)**

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)



Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages? – (Performance-orientierte Methoden)

**Relation between binder properties and damage
characteristics of pavements? (Performance orientated
methods)**

**Empa Dübendorf, Strassenbau/Abdichtungen
Dr. Martin Hugener**

**Forschungsauftrag VSS 1999/131 auf Antrag der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Martin Hugener

Mitglieder

Prof. Dr. Manfred Partl

Christiane Raab

Dr. Remy Gubler

Roland Takacs

Christian Meierhofer

Federführende Fachkommission

Fachkommission 4: Bauprodukte

Begleitkommission

Präsident

Anders Nättorp

Mitglieder

Max Seeberger

Alexander Nellen

KO-Finanzierung des Forschungsauftrags

Empa Dübendorf

Antragsteller

Empa Dübendorf, Abteilung Strassenbau/Abdichtungen

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	8
Résumé	10
Abstract	12
1 Problemstellung/ Auftrag	15
1.1 Auftrag	15
1.2 Ausgangslage, Grund für Forschungsprojekt	15
1.3 Stand des Wissens	17
1.4 Prüfmethode zur Beurteilung der Bindemittelschädigung	19
1.4.1 Empirische Prüfmethode	19
1.4.2 Neuere Prüfmethode für Bindemittel	21
2 Untersuchungsprogramm	25
2.1 Geplante Untersuchungsmethodik gemäss Forschungsantrag	25
2.2 Auswahl der Objekte	25
<i>Checkliste für Umfrage 2</i>	28
2.3 Probeentnahme	29
2.4 Prüfprogramm	29
3 Vorversuche	31
3.1 Bestimmung der massgebenden Abweichung	31
3.2 Beurteilung der signifikanten Abweichungen	33
3.3 Darstellung der wichtigen Resultate in Form eines Spinnendiagramms	34
4 Untersuchung der Objekte	36
4.1 Objekt AG1	36
4.1.1 Beschreibung	37
4.1.2 Probenahme	38
4.1.3 Resultate	39
4.1.4 Diskussion	41
4.2 Objekt AG2	43

4.2.1	<i>Beschreibung</i>	43
4.2.2	<i>Probenahme</i>	44
4.2.3	<i>Resultate</i>	45
4.2.4	<i>Diskussion</i>	47
4.3	Objekt FR1	48
4.3.1	<i>Beschreibung</i>	48
4.3.2	<i>Probenahme</i>	50
4.3.3	<i>Resultate der Deckschicht</i>	51
4.3.4	<i>Diskussion der Resultate der Deckschicht</i>	53
4.3.5	<i>Resultate der Tragschicht</i>	54
4.3.6	<i>Diskussion der Resultate der Tragschicht</i>	56
4.4	Objekt UR1	57
4.4.1	<i>Beschreibung</i>	57
4.4.2	<i>Resultate</i>	58
4.4.3	<i>Diskussion der Resultate</i>	60
4.5	Objekt UR2	61
4.5.1	<i>Beschreibung</i>	61
4.5.2	<i>Resultate</i>	62
4.5.3	<i>Diskussion der Resultate</i>	64
4.6	Objekt LU1	65
4.6.1	<i>Objektbeschreibung</i>	65
4.6.2	<i>Probenahme</i>	66
4.6.3	<i>Resultate</i>	67
4.6.4	<i>Diskussion</i>	69
5	Schlussfolgerungen	70
5.1	Vergleichende Betrachtung	70
5.1.1	<i>Schadensbilder, die vorwiegend durch höhere Temperaturen verursacht wurden</i>	70
5.1.2	<i>Schadensbilder, die vorwiegend durch tiefere Temperaturen verursacht werden</i>	73
5.2	Schlussdiskussion	78

5.2.1	<i>Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages</i>	78
5.2.2	<i>Performance-orientierte Methoden für die Bindemitteluntersuchung</i>	79
5.3	Weiterer Forschungsbedarf	80
6	Dank	82
7	Fachliche Auswertung	83
8	Literaturverzeichnis	87

Zusammenfassung

Schadhaftes oder qualitativ mangelhaftes Bindemittel ist nach Meinung verschiedener Personen die Ursache für Belagsschäden unterschiedlicher Art. Insbesondere thermische Risse, Ermüdungsrisse, fehlender Schichtenverbund, Kornausbrüche und Spurrinnen sind hier zu nennen. Das vorliegende Forschungsprojekt hatte zum Ziel, einen Zusammenhang zwischen solchen Schadensbildern und den Bindemittleigenschaften der Beläge zu suchen.

Hierzu wurden Objekte gesucht, die solche Schadensbilder aufwiesen und wo der Verdacht oder Hinweis bestand, dass das Bindemittel dafür mitverantwortlich ist. Die Suche bei Kanton und Bund ergab aber wider Erwartens nur wenige Objekte, die den geforderten Auswahlkriterien genügten. Nur insgesamt sechs Objekte in vier Kantonen konnten ausfindig gemacht werden.

Für die Untersuchungen wurden Bohrkerne aus den geschädigten Strassenbelägen und aus einem möglichst ähnlichen, ungeschädigten Referenzbelag entnommen. Am rückgewonnenen Bindemittel wurden neben Brechpunkt nach Fraass und Erweichungspunkt Ring und Kugel verschiedene neue performance-orientierte Eigenschaften mit dem Biegebalken-Rheometer (BBR) und dem dynamischen Scherrheometer (DSR) erfasst. Es sollte untersucht werden, ob mit diesen neuen Prüfmethode eine verbesserte Differenzierung der Resultate möglich war als mit den aktuellen Normprüfungen.

Das durchgeführte Forschungsprojekt zeigte klar, dass anhand von Bindemittleigenschaften alleine die Ursache von Schadensbildern an Belägen nicht nachgewiesen werden kann, auch wenn die Untersuchung auf bindemitteltypische Schäden beschränkt wurde. Schon die Tatsache, dass nach intensiver Suche nur sechs Objekte mit mutmasslicher Schädigung aufgrund des Bindemittels gefunden wurden, zeigt, dass der Einfluss des Bindemittels überschätzt wurde. Andere Kenngrössen wie Verdichtung, Korngrössenverteilung, Bindemittelgehalt, Hohlraumgehalt, mechanische und volumetrische Kennwerte haben in der Regel einen grösseren Einfluss auf die Belageigenschaften. Aus diesem Grund muss bei Planung und Durchführung von Forschungsprojekten ganz speziell darauf geachtet werden, dass alle für den Belag massgebenden Parameter berücksichtigt werden.

Die Auswertung der Resultate mit den neuen performance-orientierten Prüfmethode liefert Hinweise, dass in einigen Fällen eine bessere Differenzierung der Resultate möglich ist. Insbesondere rheologische Prüfungen mit dem DSR ergaben eine grössere Spreizung der Resultate zwischen geschädigten und nicht geschädigten

Belägen. Allerdings beruhen diese Aussagen auf sehr wenigen Messresultaten, weshalb eine weitergehende Anwendung und Validierung dieser neueren Prüfmethode notwendig ist. Als sehr wertvoll erwies sich auch die Gelpermeations-Chromatographie (GPC), da diese Methode unterschiedliche Bindemittel eindeutig voneinander zu unterscheiden vermag. Allerdings ermöglicht sie nicht direkt Aussagen über die Qualität des Bindemittels, sondern liefert eine Art Fingerprint des Bindemittels, der für die Qualitätssicherung verwendet werden kann.

Résumé

Selon différents spécialistes, les liants défectueux ou de mauvaise qualité seraient à l'origine de nombreux dommages des revêtements routiers tels que les fissures thermique et de fatigue, le manque de liaison entre les couches, l'arrachement des granulats ou encore l'orniérage. Le présent travail de recherche avait pour but d'établir s'il existait un lien de causalité entre les caractéristiques des liants et ces types de dommages.

Pour cela, on a sélectionné des objets présentant de tels dommages sur lesquels des soupçons ou des indications donnaient à penser que le liant assumait une responsabilité dans l'apparition de ces dommages. Les recherches effectuées auprès de la Confédération et des cantons n'ont, contre toute attente, abouti qu'à un faible nombre d'objets répondant aux critères fixés et seuls six objets répartis dans quatre cantons ont pu être sélectionnés pour cette étude.

Pour les examens, on a procédé à des prélèvements de carottes sur les revêtements endommagés et sur un revêtement de référence intact d'un type aussi semblable que possible. Sur le liant récupéré de ces carottes, on a effectué, en plus de la détermination du point de fragilité Fraass et du point de ramollissement bille et anneau, différents nouveaux essais de performance au moyen du rhéomètre à flexion de poutre (BBR) et du rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Ceci dans le but de déterminer si ces nouvelles méthodes d'essai permettaient une meilleure différenciation des résultats que les essais normalisés actuels.

Les résultats obtenus dans ce projet montrent clairement qu'à elle seules les caractéristiques des bitumes ne permettent pas d'élucider des causes des dommages des revêtements, cela même alors que les examens s'étaient limités aux défauts et endommagements typiques des liants. Le fait que, malgré des recherches intensives, on n'ait pu trouver que six objets présentant des dommages probablement imputables au liant, montre que l'influence du liant a été surestimée. D'autres facteurs, tels que le compactage de l'enrobé, la granulométrie des granulats, la teneur en liant, la teneur en vide ainsi que les caractéristiques mécaniques et volumétriques exercent en règle générale une influence plus importantes sur les caractéristiques des revêtements. C'est aussi la raison pour laquelle les travaux de recherche devraient prendre en compte, tant dans leur phase de planification que dans leur phase d'exécution, de la totalité des paramètres déterminants des revêtements.

L'évaluation des résultats obtenus avec les nouveaux essais de performance indique que dans quelques cas ces essais conduisent à une meilleure différenciation. En particulier, les essais avec le DSR ont révélé de grands écarts entre les liants des revêtements endommagés et non endommagés. Toutefois cette interprétation ne repose que sur un nombre très restreint de mesure et il est ainsi nécessaire de poursuivre les essais avec ces nouvelles méthodes pour leur validation. La chromatographie sur gel perméable (GPC) s'est elle aussi révélée très utile car cette méthode permet une différenciation nette des les différents liants. Elle ne permet toutefois pas d'émettre un jugement direct sur la qualité du liant mais livre une sorte d'«empreinte digitale» du liant utilisable pour le contrôle de qualité.

Abstract

Faulty or qualitatively insufficient binder, according to pavement experts, are the main reasons for a wide range of pavement damages. In particular thermal and fatigue cracking, missing interlayer bond strength, ravelling and rutting have to be mentioned. The present research project has the goal to find a relationship between these damages and the corresponding binder properties.

Hence, pavements were evaluated which showed such kind of failure modes possibly caused by partial involvement of the binder. A request at national and regional road authorities resulted surprisingly in a low number of objects matching the required criteria: only six objects in four cantons have been identified.

Cores from damaged pavements and corresponding non-damaged reference sites with properties as similar as possible have been investigated. The recovered binder was tested with Fraass breaking point and softening point ring and ball. In addition, several of the new performance oriented properties were measured with the bending beam rheometer (BBR) and the dynamic shear rheometer in order to learn, whether a higher differentiation can be achieved in respect to the actual standard test methods.

As a conclusion, the research project showed clearly that the binder properties on its own are not able to explain the cause of damaged pavements, even when the selection was restricted to binder typical defects. Just the difficulties in finding suitable objects shows, that the role of the binder was originally overestimated. In general, compaction, aggregate gradation, binder and void content, as well as other volumetric and mechanical characteristics of the hot mix have a stronger influence on the performance of the pavement. Therefore, it is of particular importance to consider all relevant parameters for the performance behaviour of mixtures already in the planning and implementation of a research project, instead of focussing only on few selected ones.

Evaluation of the results of the new performance oriented test methods gave indications, that in some cases the differentiation of the results was better. Particularly, the rheological tests with DSR resulted in a larger spread of the results between damaged and undamaged pavements. However, this statement is based on a restricted number of results and further use and validation of these new test methods are necessary. Gel permeation chromatography proved to be a very valuable tool to discriminate between binders of distinct origins. Although this information isn't directly related to the binder quality it gives a kind of fingerprint useful for quality assurance.

Abkürzungen

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BBR	Biegebalkenrheometer
CEN	Europäisches Komitee für Normung
DSR	dynamisches Scherrheometer
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungs-Anstalt
EN	Europäische Norm
EVT	Äquiviskositätstemperatur bei niedriger Scherviskosität
GPC	Gelpermeations-Chromatographie
PmB	Polymermodifizierte Bitumen
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Blockpolymer
SN	Schweizer Norm
SHRP	Strategic Highway Research Program der USA, 1988 - 1993
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
ZSV	Null-Scherviskosität (Zero Shear Viscosity)

1 Problemstellung/ Auftrag

1.1 Auftrag

Das Bundesamt für Strassen ASTRA beauftragte am 13.12.1999 die EMPA Abteilung Strassenbau/Abdichtungen den Forschungsauftrag Nr. 23/99 IDS/DIR-Nr. 3147.01 "Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belags (Performanceorientierte Methoden)" durchzuführen.

1.2 Ausgangslage, Grund für Forschungsprojekt

Bindemittleigenschaften stehen mutmasslich in direktem Zusammenhang mit den wichtigsten Schadensbildern, die in der Schweiz auftreten. Dies ist die Aussage verschiedener im Strassenbau tätigen Personen, die bei einem Schaden oft dem Bindemittel die Ursache zuschreiben. Diese Hypothese eines eindeutigen Zusammenhanges zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern im bitumenhaltigen Belag soll deshalb in diesem Projekt geklärt werden. Da die Zusammenhänge zwischen Schadensrisiken und Bindemittleigenschaften insbesondere für schweizerische Verhältnisse unzureichend bekannt sind, sind fundiertere Verfahren zur Bindemittelbeurteilung als die bisher normierten von grosser praktischer Bedeutung.

Dies ist auch im europäischen Bereich unbestritten. In der europäischen Normierungskommission CEN TC336 WG1 "Bituminous binders" wird inzwischen bereits an der nächsten Normengeneration gearbeitet, die auf performance-orientierten Anforderungen basieren wird [1]. Bisher wurden Anforderungen und Prüfverfahren in praktisch allen Ländern aufgrund ihrer Erfahrungen entwickelt und kontinuierlich angepasst. Diese sogenannten empirischen Anforderungen haben aber den Nachteil, dass sie in der Regel keine Auskunft über die Qualität eines Bindemittels geben können. Der Penetrationswert beispielsweise ist ein Mass für die Härte eines Bitumens bei 25°C [2]. Bei nicht modifizierten Bindemitteln konnte der Penetrationswert noch als Qualitätsindikator dienen, da die Bindemittelhärte indirekt mit der Anfälligkeit auf Spurbildung oder die Entstehung von Kälterissen in Zusammenhang gebracht werden konnte. Dies ist bei polymermodifizierten Bindemitteln jedoch nicht der Fall.

In zukünftigen Normen sollen deshalb die Anforderungen unabhängig vom Bindemitteltyp sein. Das heisst, ob es sich um ein Polymerbitumen, ein temperaturreduziertes Bitumen mit Wachs oder um ein nicht modifiziertes Strassenbitumen handelt, die Anforderungen sollen

für alle im Strassenbau verwendeten Bitumen und bitumenhaltigen Bindemittel gleich sein. Ausgeschlossen davon sind Industriebitumen, die im Hochbau und für andere industrielle Anwendungen verwendet werden.

Verschiedene neue Prüfmethode wurden bezüglich möglicher Eignung durch CEN-Arbeitsgruppen evaluiert und einige davon in Form von neuen europäischen Normen oder technischen Spezifikationen veröffentlicht. Einige neue oder von SHRP¹ abgeleitete Prüfverfahren wie die Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) [3], Bestimmung der Null-Scherviskosität (ZSV) [4] der Äquiviskositätstemperatur bei niedriger Scherviskosität (EVT) [5] oder des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels mittels dynamischem Scherrheometer (DSR) [6] stehen in einigen europäischen Ländern schon in der Erprobung [7]. Zusätzlich wurden zwei Alterungsverfahren entwickelt: Die beschleunigte Langzeitalterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV) [8] und ein Alterungsverfahren mit rotierendem Zylinder (RCAT) [9]. Gegenwärtig werden für diese neu eingeführten Prüfmethode die charakteristischen Eigenschaften der auf dem Markt erhältlichen Bindemittel ermittelt, damit die Bitumenhersteller wissen, wo ihre Produkte einzuordnen sind.

Die Datenbasis für die Definition von performance-orientierten Anforderungen, sowie der nötige, breit abgestützte Nachweis des Praxisbezugs der Prüfmethode fehlen allerdings noch, sowohl für schweizerische und als auch für europäische Verhältnisse. Diese werden in einem weiteren Schritt mit Feldversuchen validiert werden müssen, was in der Phase 3 des BitVal-Projektes vorgesehen ist [10]. Das BitVal-Projekt wurde durch die Organisation FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) initiiert und hat folgende Zielsetzungen:

- geeignete Instrumente für die Beurteilung der Eignung von Prüfmethode zur Charakterisierung der relevanten Bindemittleigenschaften zur Verfügung zu stellen
- Korrelationen zwischen Bindemittel und Asphalteigenschaften aufzuzeigen
- ausreichendes Vertrauen für das zukünftige europäische Spezifikationssystem von Bindemitteln zu geben

Es ist aber klar, dass die Bindemittleigenschaften nicht allein massgebend für die Performance von Strassenbelägen ist, sondern andere Einflussfaktoren wie Mineralstoffeigenschaften, Mix Design, Mischgutherstellung und Belagseinbau ebenso wichtig sind.

¹ SHRP Strategic Highway Research Program der USA, 1988 - 1993

Die Gestaltung der europäischen Normen wird für den schweizerischen Strassenbau eine entscheidende Bedeutung haben, da die Schweiz diese Normen zwingend übernehmen muss. Fachlich fundierte Aussagen sind dabei für ein kleines Land wie die Schweiz die einzige Möglichkeit, Einfluss auf die europäische Normierung zu nehmen.

Die Ergebnisse dieser Forschung sollen die Praxisrelevanz einiger dieser Prüfungen aufzeigen. Allerdings standen zum Projektbeginn erst die DSR- und BBR-Prüfungen fest. Die entscheidende Frage ist:

Mit welchen Bindemittleigenschaften kann das Risiko von Belagsschäden nachhaltig reduziert werden?

1.3 Stand des Wissens

Die Schäden an Strassenbelägen können bezüglich der volkswirtschaftlichen Bedeutung grob kategorisiert werden. Im Zusammenhang mit der Rolle des Bindemittels ergibt sich das in Tabelle 1 aufgeführte Bild.

Schadensbild	Kategorie	Rolle des Bindemittels
Spurrinnen	sehr bedeutend	wichtig
Ermüdungsrisse	sehr bedeutend	wichtig
Setzungen, Längsrisse etc.	bedeutend	unwichtig
Thermische Risse	mässig bedeutend	wichtig
Schichtenverbund	bedeutend	teilweise wichtig
Kornausbrüche	mässig bedeutend	teilweise wichtig

Tabelle 1: Die Rolle des Bindemittels bei Belagsschäden

Der Zusammenhang der Bindemittleigenschaften mit den Schadensbildern an Deckbelägen aus Walzasphalt stützt sich meist nur auf punktuelle Untersuchungen (enger Kreis ausgewählter Bindemittel, einzelne Teststrecken, spezielle Asphaltorte) und auf teilweise subjektive Erfahrungen und Beobachtungen. Einige Beispiele sind in den Forschungsarbeiten [11-14] aufgeführt. Eine ganze Serie von Bindemitteln wurde in den 16 Teststrecken im Kanton Wallis [15] eingesetzt und ausführlich untersucht. Allerdings

repräsentieren diese Strecken eine einzige klimatische Situation, weisen eine identische Verkehrsbelastung auf und betreffen im Wesentlichen nur einen Schadenfall, die Rissbildung. Literaturrecherchen, wie sie im Rahmen von SHRP durchgeführt wurden, umfassen mehr Datenmaterial. Die Recherchen basieren auf älteren Forschungen, bei denen sehr unterschiedliche Prüfverfahren angewendet wurden, was Vergleiche erschwert. Vor allem beziehen sie sich weitgehend auf amerikanische und kanadische Strassenabschnitte, die sich deutlich von den schweizerischen Verhältnissen unterscheiden (Klima, Einbautechnik, Mineralstoffe, Belagsaufbau etc.). Die Fragestellung des Forschungsauftrages kann somit durch die in der Literatur beschriebenen Arbeiten nicht beantwortet werden.

Im Moment laufen weltweit Untersuchungen an LTPP-Strecken (Long Term Pavement Performance), in der Schweiz sind dagegen nur geringe Aktivitäten zu verzeichnen [16, 1991 #1046]. Das muss ebenfalls als eine unzulängliche Basis für die Fragestellung dieses Forschungsauftrages betrachtet werden.

Fazit:

Es besteht eine echte Erkenntnislücke was den Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern angeht. Es überwiegen allgemeine und theoretische Vorstellungen und es fehlen gezielte Objektuntersuchungen mit modernen Prüfmethoden.

1.4 Prüfmethode zur Beurteilung der Bindemittelschädigung

Schadensbild	Bindemittleigenschaften	Prüfmethode
Spurrinnen	niedrige Viskosität bei hohen Betriebstemperaturen, "Weichheit"	DSR [6], Erweichungspunkt Ring und Kugel [17], Viskosität bei 60°C [18], GPC [19]
Ermüdungsrisse	Sprödigkeit bei mittleren Betriebstemperaturen	DSR [6], GPC [19]
Thermische Risse	Sprödigkeit in der Kälte	BBR [3], Brechpunkt nach Fraass [20]
Fehlender Schichtenverbund	Haftvermögen	Bestimmung der Kohäsion des Bindemittels mittels Kraftduktilität [21]
Kornausbrüche	Haftvermögen am Gestein, Sprödigkeit des Bindemittels, Wasserempfindlichkeit	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen [22], DSR [6]

Tabelle 2: Prüfmethode zur Beurteilung der Bindemittelschädigung

Die Tabelle 2 gibt eine generelle Übersicht, wie die Bindemittleigenschaften mit den wichtigsten und häufigsten Schadensbildern in Strassenbelägen im Zusammenhang stehen [23]. Sie führt Prüfverfahren auf, mit denen Bindemittleigenschaften gemessen werden können, die Hinweise auf Belagsschäden geben können.

1.4.1 Empirische Prüfmethode

Bindemittleigenschaften werden oft aufgrund bekannter, empirischer Prüfungen normiert. In der Schweizer Norm und den europäischen Normen sind dies: Brechpunkt nach Fraass [20], Penetration [2], Erweichungspunkt Ring und Kugel [17], Viskosität bei 60°C [18]. Im Strategic Highway Research Program (SHRP) und in den kommenden europäischen Normen wird von theoretischen Überlegungen ausgegangen (Lastfälle, Schadensmechanismen, Klima) und eine Klassierung auf Basis rein mechanischer Prüfungen (BBR [3], DSR [6]) u. a. m. eingeführt [24].

Die Aussagefähigkeit der empirischen Prüfungen bezüglich Eignung des Bindemittels ist bekanntlich limitiert:

1.4.1.1 Brechpunkt nach Fraass

Aufgrund der schlechten Vergleichbarkeit des Brechpunktes nach Fraass von 6°C kann nicht sicher zwischen einem Bitumen 70/100 und einem Bitumen 40/50 unterschieden werden [7],[20]. Die Prüfung ergibt deshalb nur einen groben Hinweis auf das Kälteverhalten.

1.4.1.2 Penetration:

Die Bestimmung der Penetration dient primär zur Sorteneinteilung [2]. Als empirische Prüfung erfasst sie die mechanischen Eigenschaften des Bindemittels ungenügend und kann insbesondere nicht zur Abschätzung des Risikos von Ermüdungsrissen dienen. Für PmB ist die Penetration wenig geeignet für eine qualitative Beurteilung.

1.4.1.3 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Die Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel ist eine empirische Prüfung, die insbesondere zur Charakterisierung polymermodifizierter Bindemittel nicht ausreichend ist [17]. Sie gibt zusammen mit der Viskosität bei 60°C für nicht modifizierte Strassenbaubitumen Hinweise über das Risiko der Spurrinnenbildung. Allerdings haben bei diesem Schadensbild die Mischguteigenschaften und die unteren Schichten in der Regel den grösseren Einfluss.

1.4.1.4 Dynamische Viskosität

Die Bestimmung der dynamischen Viskosität bei 60°C gibt für nicht modifizierte Strassenbaubitumen Hinweise über das Risiko der Spurrinnenbildung [18]. Sie erfasst aber weder bei Strassenbaubitumen noch bei modifiziertem Bitumen das elastische Verhalten und kann deshalb gerade in Hinblick auf Spurrinnenbildung zu Fehlbeurteilungen führen.

1.4.2 Neuere Prüfmethode für Bindemittel

1.4.2.1 Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels mit dem Dynamic Shear Rheometer (DSR)

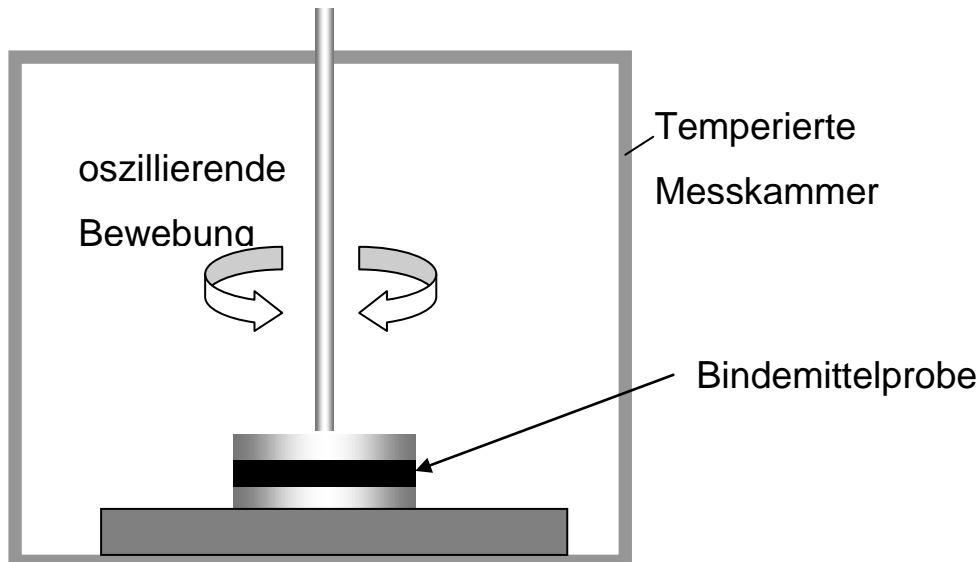


Abbildung 1: Skizze des Dynamic Shear Rheometers

Das dynamische Scherrheometer DSR ist ein Platte-Platte-Viskosimeter, bei dem das Bindemittel zwischen den beiden Platten bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen oszillierenden Scherbelastungen ausgesetzt wird (Abbildung 1) [25]. Es wird das Drehmoment und die Phasenverschiebung zwischen Belastung und Dehnung gemessen, woraus das komplexe Schermodul G^* und der Phasenwinkel δ berechnet werden. Der Betrag des komplexen Schermoduls G^* ist ein Mass für die Bindemittelsteifigkeit und der Phasenwinkel gibt das Verhältnis von elastischem zu viskosem Anteil an. Bei einem Phasenwinkel von 0° ist der elastische Anteil maximal und bei einem Phasenwinkel von 90° der viskose Anteil (Abbildung 2).

Zur Vermeidung von bleibenden Verformung wie Spurrinnen sollte der viskose Anteil möglichst klein (= möglichst kleiner Phasenwinkel) und das Bindemittel möglichst steif (= möglichst grosser Schermodul) sein, was mathematisch mit einem möglichst grossem " $G^*/\sin(\delta)$ " ausgedrückt wird, der hier als Verformungskennwert bezeichnet wird. Nicht modifizierte Strassenbaubitumen haben bei höheren Temperaturen nur einen kleineren elastischen Anteil und der Betrag des Schermoduls ist praktisch gleich gross wie der Verformungskennwert, da der Term $\sin(\delta)$ für Werte um 90° gegen 1 strebt. Diese Hypothese wird neuerdings angezweifelt, da entsprechende Feldversuche in gewissen Fällen nicht mit den vorhergesagten Labordaten übereinstimmten [26, 27]. Deshalb wurden

durch die CEN weitere Testmethoden mit dem DSR-Gerät vorgeschlagen (ZSV [4], EVT [5]), die nun in der Evaluationsphase sind. In diesem Projekt wird noch der Verformungskennwert bei 60°C ausgewertet, da die neuen Methoden zu Beginn des Forschungsprojektes noch nicht bereit waren.

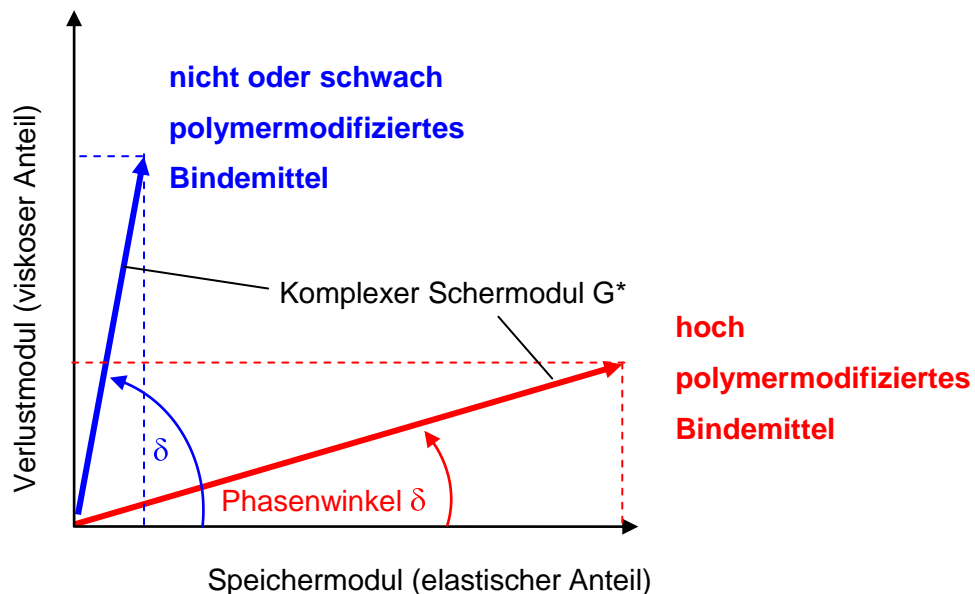


Abbildung 2: Elastischer und viskoserer Anteil des Schermoduls bei der DSR-Messung

Messungen bei mittleren Umgebungstemperaturen um 20°C können Informationen über die Anfälligkeit von Bindemitteln auf Ermüdungsrisse geben. In diesem Bereich sind Bitumen und PmB viskoelastisch, das heisst sie zeigen sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften. Um Ermüdungsrisse zu verhindern, darf das Bindemittel nicht zu steif sein (G^* sollte klein sein) und sollte zudem einen möglichst hohen elastischen Anteil haben (δ sollte klein sein), damit Stösse und Vibrationen des Strassenverkehrs möglichst zu keinen Schäden führen kann. Der hier als Ermüdungskennwert bezeichnete Verlustmodul $G^* \cdot \sin \delta$ bei 20°C darf deshalb bei SHRP einen Wert von 5000 kPa nicht überschreiten.

1.4.2.2 Biegekriechsteifigkeit mit dem Bending Beam Rheometer (BBR)

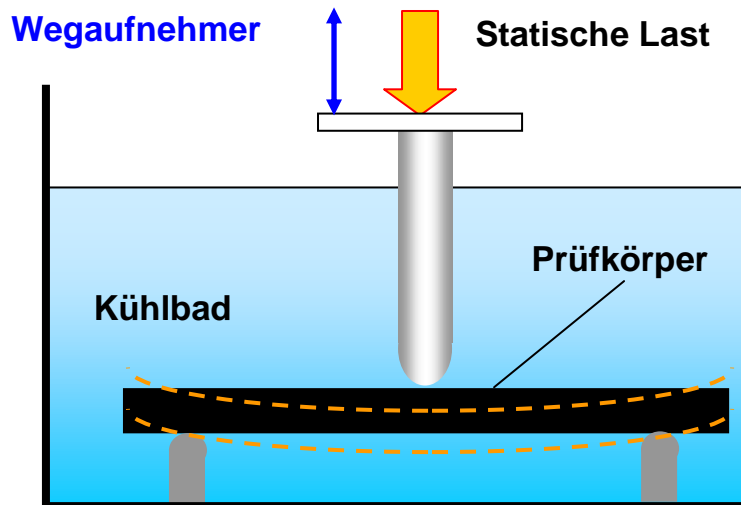


Abbildung 3: Prinzip des Biegebalken-Rheometers BBR

Das Biegebalken-Rheometer (engl. Bending Beam Rheometer, BBR) prüft einen balkenförmigen Bitumenprüfkörper in einem 3-Punktbiegegerät unter konstanter Last bei tiefen Temperaturen (in der Regel unter 0°C) in einem einfachen Biegekriechversuch [25]. In dieser Prüfung wird die Deformation als Funktion der Zeit gemessen und daraus die Kriechsteifigkeit als massgebende Grösse berechnet wird. Diese darf nicht zu hoch sein, da sie ein Mass für die Bildung von thermisch induzierten Zugspannungen ist, die bei der Abkühlung des Bindemittels aufgebaut werden. Die Veränderung der Kriechsteifigkeit über die Zeit, kurz m-Wert genannt, ist ein Mass für die Fähigkeit, die gebildeten Zugspannungen rissfrei abzubauen. Belagsrisse bei tiefen Temperaturen entstehen, wenn das Bindemittel die durch die temperaturbedingte Volumenreduktion entstehenden Kräfte nicht mehr aufnehmen kann.

1.4.2.3 Gelpermeations-Chromatographie (GPC)

Mittels Gelpermeations-Chromatographie kann die Verteilung der Bindemittelkomponenten bezüglich ihrer Grösse respektive ihrer Molekularmasse bestimmt werden [19, 28, 29]. Diese chemische Analysemethode wird oft in der Polymerchemie für die Charakterisierung von verschiedenen Polymeren eingesetzt. Das Prinzip der Gelpermeations-Chromatographie 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 4). 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. Die GPC wird allerdings nicht zu den performance-orientierten Prüfung gezählt, da keine direkten Performancekriterien abgeleitet werden können.

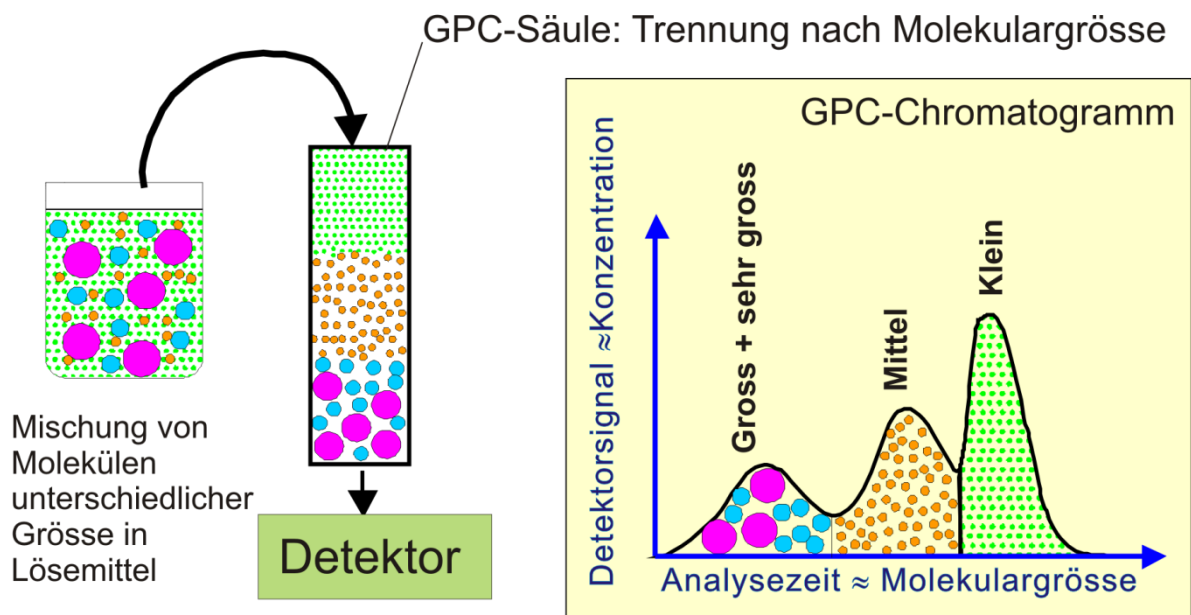


Abbildung 4: Prinzip der Gelpermeationschromatographie

2 Untersuchungsprogramm

2.1 Geplante Untersuchungsmethodik gemäss Forschungsantrag

In dieser Forschung soll gezielt nach dem Praxisbezug von Prüfverfahren, insbesondere für schweizerische Verhältnisse, gesucht werden. Es werden dazu geschädigte Strassenabschnitte ausgewählt und in eine Systematik gebracht, um dann an den aufgearbeiteten Bindemitteln ein zielgerichtetes Versuchsprogramm durchzuführen. Die Forschung beschränkt sich auf Schäden, bei denen das Bindemittel eine wesentliche Rolle spielt. Das sind Spurrinnenbildung, Ermüdungsrisse und Kälterisse. Spurrinnenbildung und Ermüdungsrisse werden prioritär behandelt.

2.2 Auswahl der Objekte

In den USA und Kanada wurden ab 1987, im Rahmen des 20-jährigen Programmes "Long-Term Pavement Performance" (LTPP), Daten von über 2400 Asphaltstrassen gesammelt. Damit sollte die Frage beantwortet werden, warum gewisse Strassenbeläge eine längere Lebensdauer aufwiesen als andere. Mit der Datenbank STRADA, wurde in der Schweiz durch das ASTRA ein ähnliches Projekt gestartet, das ebenfalls Informationen über den Aufbau und Zustand der Strassenbeläge von schweizerischen Nationalstrassen und teilweise Kantonsstrassen sammelte.

Da sich der Aufbau der Datenbank STRADA verzögert hatte, mussten aber Daten über geeignete Objekte auf einem anderen Weg erhalten werden. So wurde entschieden, die Kantone als Besitzer von Autobahnabschnitten und Kantonsstrassen direkt anzufragen. Dazu wurden in einer ersten Runde 10 Kantone und einige grössere Strassenbaufirmen telefonisch angefragt, ob sie Objekte mit Belagsschäden haben, die folgenden Kriterien entsprechen:

- der Schaden ist vermutlich auf das Bindemittel zurückzuführen
- eine Vergleichsstrecke ohne Schäden mit gleichem Bindemittel und Belagstyp sollte vorhanden sein

- bevorzugte Belagstypen: Asphaltbeton AB (Asphaltbeton AC²), Splittmastix (SMA), Heissmischtragschicht HMT (Asphaltbeton AC T), ev. Rauasphalt AC MR (Asphaltbeton MR)
- Alter der Belagsschäden: 0 - 5 Jahre, bei Kälteschäden eventuell älter, da hier ein sehr kalter Winter Voraussetzung ist

Das Resultat dieser ersten Umfrage war ernüchternd: Die meisten angefragten Personen konnten keine passenden Objekte nennen. Bei vielen der bekannten Objekte mit Belagsschäden war meistens nicht das Bindemittel die Ursache. Vor allem bei Rissbildung waren diese Schäden häufig auf Probleme mit den unteren Schichten (z.B. Stabilisationen mit Zement) zurückzuführen. Die geringe Anzahl an Bindemittelschäden hat sehr erstaunt, da vorher in den VSS-Kommissionen des öfteren von Problemen mit mangelhaften Bindemitteln gesprochen wurde.

Ein weiteres Hindernis bei dieser Umfrage war die Forderung nach einer Vergleichsstrecke mit gleichartigem Aufbau und identischen Materialien, was oft nicht möglich war.

Als Schlussfolgerung musste festgehalten werden, dass die Anforderungen an die gewünschten Objekte aufgrund des beabsichtigten streng wissenschaftlichen Ansatzes zunächst zu eng gefasst worden waren und demzufolge die Auswahlkriterien neu in pragmatischem Sinne überdacht werden mussten. Dies allerdings im Bewusstsein, dass die Aussageschärfe möglicherweise beeinträchtigt werden könnte.

Aufgrund der Resultate der ersten Umfrage wurden die Anforderungskriterien abgeändert und eine neue Checkliste erstellt (Abbildung 5). Die Anforderungen an den Belagstyp und an das Alter des Belages zum Zeitpunkt des erstmaligen Auftretens des Schadens wurden reduziert. Insbesondere wurde auch auf eine Vergleichsstrecke mit möglichst identischem Belag verzichtet. Es wurde gehofft, dass ein solcher Referenzbelag ohne Schäden besser auch in einem anderen Kanton gefunden werden könnte.

Die neue Checkliste wurde per Post oder per e-mail an die meisten Kantone, sowie an die grossen Städte Zürich, Winterthur und Bern versandt. Nach einem Monat wurde telefonisch nachgefragt, falls bis dann keine Antwort eingetroffen war.

Trotz dieser Anstrengungen und dem reduzierten Anforderungskatalog war das Resultat der Umfrage noch immer wenig ermutigend. Nur gerade ein halbes Dutzend Meldungen waren eingegangen, die noch überprüft werden mussten.

² neue Bezeichnungen gemäss EN 13108-1 in Klammern [30]

Die mangelnde Anzahl an Objektmeldungen mit Bindemittelschäden hat unserer Ansicht nach verschiedene Ursachen:

Einige der vorgeschlagenen Objekte erwiesen sich als ungeeignet. So betrafen einige Belagsschäden Objekte, bei denen ein plastomer-modifiziertes Bindemittel eingesetzt wurde, oder wo Plastomere direkt den heissen Mineralstoffen zugemischt wurde (z.B. Betaplast). Bei diesen modifizierten Belägen besteht das Problem, dass das Bindemittel nicht zurück gewonnen werden kann, ohne dass sich dessen Eigenschaften verändern, da Plastomere im Gegensatz zu Elastomeren (wie z. B. SBS³) sich mit den üblichen Lösemitteln durch Heissextraktion nur teilweise aus den Bohrkernen lösen lassen. Interessanterweise führten aber gerade diese Bindemittel zu Belagsschäden. Dies dürfte ein Grund sein, warum sie heute weitgehend vom Schweizer Markt verschwunden sind.

Die in gewissen Kantonen mangelnde oder gar fehlende Dokumentation über den Einbau ihrer Strassenbeläge erschwerte die Objektsuche teilweise erheblich. So konnte oft nicht genau bestimmt werden, welches Bindemittel beim Einbau verwendet wurde oder wie der Belagsaufbau genau war. Resultate von Bindemitteluntersuchungen an den eingebauten Belägen waren nur in den seltensten Fällen vorhanden. Für solche Objekte war es deshalb unmöglich, Vergleichsstrecken zu finden. Als einzige Lösung in diesen Fällen war eine Probenahme aus der Gegenfahrbahn oder in einem anderen Strassenabschnitt, der eventuell an einem anderen Tag eingebaut wurde und keine Schäden aufzeigte.

Nach dieser längeren Evaluationsphase wurden 6 Objekte in 4 Kantonen (Tabelle 7) für eine Untersuchung ausgewählt, die einen Teil der aufgestellten Kriterien erfüllten.

³ SBS: Styrol-Butadien-Styrol-Blockpolymer

Checkliste für Umfrage 2

gesuchte Strecken:

primär schadhafte Strecken mit Spurrinnen oder Rissen (keine Strecken, wo sicher ist, dass die Ursache nicht beim Bindemittel liegt, bei Unsicherheit wird die Ursache untersucht werden)

Belagstyp: Prinzipiell alle Typen von Walzasphalt

Bindemittel: Normalbitumen und PmB, kein Betaplast

Alter der Strecke: Auftreten des Schadens ist massgebend: Risse wenn möglich < 10 Jahre,
Spurrinnen < 5 Jahre nach Auftreten des Schadens

Strassentyp: kantonale Hauptstrassen, Autobahnen, Gemeindestrassen mit viel Verkehr

Vergleichsstrecke :

- nicht mehr Bedingung, kann ev. in anderem Kanton gefunden werden
- falls vorhanden: möglichst gleich: mit gleichem Belagstyp und gleiche Bindemittelsorte, gleiche Verkehrsbelastung

Benötigte Proben:

6 – 8 Bohrkerne, Durchmesser 150 mm, je von guter und geschädigter Strecke

Benötigte Angaben:

- Schadensart
- Streckenangaben: Ort, Alter
- Belagsaufbau: Belagstyp, Bindemittelsorte

Abbildung 5: Checkliste für die 2. Umfrage

2.3 Probeentnahme

Das Konzept der Probeentnahme war darauf ausgerichtet, eine genaue Schadensbeurteilung zu ermöglichen und den Bindemittelbedarf für die vorgesehenen Prüfungen zu decken. Dies führte zu folgendem Entnahmeplan: - Pro Entnahme je 4 bis 6 Bohrkerne mit Durchmesser 150 mm, sowohl für die geschädigte Stelle als auch bei der ungeschädigten Referenzstelle. Bei Schäden mit Spurrinnen wurden quer über die beiden Spurrinnen der geschädigten Fahrspur mindestens 8 Bohrkerne zum Aufnehmen des Querprofils und Erfassen des Deformationsverlaufs entnommen.

2.4 Prüfprogramm

Neben dem Erfassen des Schadensbildes gemäss Schadenskatalog [30] enthält das Versuchsprogramm verschiedene Prüfungen am extrahierten und aufgearbeiteten Bindemittel. Je nach Schadensbild wurden gewisse Prüfungen nicht durchgeführt: Bei Spurrinnen, die bei höheren Temperaturen entstehen, wurde beispielsweise auf die Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass verzichtet.

Bei allen Schadensbildern wurde eine Mischgutuntersuchung mit Bestimmung des Bindemittelanteils, des Hohlraumgehaltes, der Korngrößenverteilung sowie der Rohdichte (vormals Dichte) und der Raumdichte (vormals Rohdichte) durchgeführt. Nach Extraktion mit Toluol wurden am rückgewonnenen Bindemittel die Normprüfungen „Erweichungspunkt Ring und Kugel“, sowie teilweise der „Brechpunkt nach Fraass“ und das „Haftvermögen des Bindemittels an den Mineralstoffen“ durchgeführt. Als wichtiger Bestandteil des Prüfprogramms wurden die performance-orientierten Prüfmethode mittels Dynamischen Scherrheometer (DSR) im Bereich 10 bis 70°C und mittels Biegebalkenrheometer (BBR) bei -12°C durchgeführt. Ausserdem wurde die Gelpermeations-Chromatographie (GPC) zum Erfassen des Zustandes der Polymere im PmB durchgeführt. Die GPC wird allerdings nicht zu den performance-orientierten Prüfung gezählt, da keine direkten Performancekriterien abgeleitet werden können.

Die Mischgutuntersuchungen fanden noch vor der Umstellung auf die europäischen Normen im Jahre 2005 statt und wurden deshalb nach den damals gültigen Schweizer Normen durchgeführt. Die Bindemittel wurden hingegen nach europäischen Normen

untersucht, wo diese vorhanden waren. Für die DSR- und BBR-Prüfungen wurden die provisorischen amerikanischen Normen von AASHTO4 verwendet.

SN 671 965	Bituminöses Mischgut - Dichte (neue Bezeichnung: Rohdichte) [31]
SN 671 967	Rohdichte (neue Bezeichnung: Raumdichte), Berechnen des Hohlraumgehaltes [32]
SN 671 955	Bindemittlextraktion und Bestimmen des löslichen Bindemittelanteils [33]
SN 670 810	Siebanalyse [34]

Bindemitteluntersuchungen

SN 671 860	Rückgewinnung des Bindemittels aus Extraktionslösungen [35]
EN 1426:1999	Bestimmung der Nadelpenetration [2]
EN 1427:1999	Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring und Kugel Verfahren [17]
EN 12593:1999	Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass [20]
SN 671 960	Haftvermögen von bituminösen Bindemitteln an Mineralstoffen [22]
AASHTO TP1	Biegekriechsteifigkeit mit dem Bending Beam Rheometer (BBR) [25]
AASHTO TP5	Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels mit dem Dynamic Shear Rheometer (DSR) [36]
Empa-Methode	Bestimmung der Bindemittelverteilung mittels Gelpermeations-Chromatographie [19]

Die am rückgewonnenen Bindemittel durchgeführten Prüfungen waren limitiert, da in der Regel nicht mehr als 6 Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm pro Objekt entnommen werden konnten. Dies ergab je nach Schichtdicke etwa 300 g Bindemittel. Aus diesem Grunde wurde die Bestimmung der Penetration nicht in allen Fällen durchgeführt.

⁴ AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials

3 Vorversuche

3.1 Bestimmung der massgebenden Abweichung

Vor der Durchführung der eigentlichen Untersuchungen an den Objekten wurde ein Vorversuch durchgeführt, um entscheiden zu können, was für einen Wert eine Bindemittleigenschaft aufweisen muss, um als signifikanter Unterschied zu gelten. Die in den Normen vorgegebenen Wiederholpräzisionen r können dabei nur als Anhaltspunkte gelten, da diese in der Regel in Ringversuchen ermittelt wurden und deshalb Mittelwerte von verschiedenen Laboratorien sind. Diese können erhebliche Unterschiede in Ausbildung der Mitarbeiter und Präzision der Prüfmittel aufweisen. In diesem Forschungsprojekt wird vor der eigentlichen Bindemitteluntersuchung immer eine Extraktion des Bohrkerns mit anschließender Rückgewinnung des Bindemittels aus der erhaltenen Bindemittellösung durchgeführt [35], was zwingendermassen zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führt. Ebenso beeinflussen gewisse Inhomogenitäten des Belages die Messunsicherheit negativ. Wohl wurde darauf geachtet, dass die Bohrkerns möglichst in einer eng begrenzten Fläche entnommen wurden, aber gewisse Unterschiede können aufgrund der Natur des Baustoffes trotzdem auftreten.

Auf der anderen Seite sind nur die relativen Unterschiede zwischen zwei Proben (aus beschädigtem und unbeschädigtem Belag) massgebend, wodurch sich gewisse systematische Fehler aufheben können und die Messunsicherheit geringer wird. Zudem wurde die Extraktion und Bindemittelrückgewinnung praktisch gleichzeitig und immer von derselben Person durchgeführt.

Zur Bestimmung der massgebenden Unterschiede wurde in einem Vorversuch eine Doppeluntersuchen an einem Mischgut AB11 (AC 11) durchgeführt. Diese Untersuchungen berücksichtigen den Extraktionsschritt mit nachfolgender Rückgewinnung des Bindemittels, jedoch nicht allfällige Unterschiede in den Bohrkernen.

Mischgut AB 11				Mittelwert	Abweichung vom Mittelwert	
		Probe A	Probe B		absolut	relativ
Prüfmethode						
Bindemittelgehalt	Masse-%	5.56	5.48	5.52	0.04	0.75%
Fillergehalt	Masse-%	9.34	9.28	9.31	0.03	0.33%
Siebdurchgang bei 1 mm	Masse-%	26.25	26.20	26.22	0.03	0.10%

Tabelle 3: Bestimmung der Wiederholpräzision für die Mischgutuntersuchung am Beispiel eines AB 11

Bindemittel				Mittelwert	Abweichung vom Mittelwert	
		Probe A	Probe B		absolut	relativ
Prüfmethode						
Fraass	°C	-9.7	-8.3	-9.0	0.7	
BBR Steifigkeit -12°C		111	123	117	6.2	5.3%
BBR m-Wert		0.35	0.36	0.35	0.001	1.3%
DSR G* bei 10°C	Pa s	8'110'000	9'810'000	8'960'000	848'000	9.5%
DSR Ermüdungskennwert (20°C)		2'040'000	2'470'000	2'260'000	217'000	9.6%
Penetration bei 25°C	0.1mm	29.7	29.0	29.3	0.33	1.1%
DSR G* bei 40°C	Pa s	217'000	220'000	219'000	1500	0.69%
DSR Verformungskennwert (60°C)	Pa	14'200	14'700	14'400	214	1.5%
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	59.4	59.9	59.6	0.3	0.46%
DSR G* bei 70°C	Pa s	3440	3650	3547	103	2.9%
Umhüllung mit Referenzmineralstoffen	%	47	48	47.5	0.5	1.1%

Tabelle 4: Bestimmung der Wiederholpräzision der Bindemittelprüfungen am rückgewonnenen Bindemittel eines Mischgutes AB 11

3.2 Beurteilung der signifikanten Abweichungen

In

Tabelle 5 und

Tabelle 6 werden neben den gemessenen Abweichungen der Vorversuche die Wiederholpräzisionen nach massgebender Norm sowie die Festlegung des signifikanten Unterschieds aufgelistet. Ein signifikanter Unterschied bedeutet, dass die Unterschiede zweier Messresultate auf Unterschiede in den Proben und nicht auf Messunsicherheiten beruhen. In der Regel wurden Werte grösser als die Wiederholpräzision gemäss massgebender Norm als signifikante Unterschied definiert und mit "+" gekennzeichnet. Unterschiede, die im Vergleich mit den in den erwähnten Tabellen festgestellten Wert mehr als doppelt so gross waren, wurden mit "++" markiert. Nicht signifikante Unterschiede wurden mit "-" gekennzeichnet.

Mischgut		Mittelwert	Abweichung vom Mittelwert		Wiederholpräzision gemäss SN	als signifikant definierter Unterschied
Prüfmethode	Einheit		absolut	relativ		
Bindemittelgehalt	Masse-%	5.52	0.04	0.75%	0.1	0.1
Hohlraumgehalt	Vol.%	-	-	-	0.5	0.5
Durchgang 1 mm	Masse-%	26.22	0.03	0.10%	-	1
Füllergehalt	Masse-%	9.31	0.03	0.33%	-	1

Tabelle 5: Signifikante Unterschiede für Mischgutuntersuchungen

Bindemittel		Mittelwert	Abweichung vom Mittelwert		Wiederholpräzision gemäss EN	als signifikant definierter Unterschied
Prüfmethode	Einheit		absolut	relativ		
Fraass	°C	-9.0	0.7		3°C	3°C
BBR Steifigkeit - 12°C		117	6.2	5.3%	9%	10%
BBR m-Wert		0.35	0.001	1.3%	4%	4%
DSR G* bei 10°C	Pa s	8'960'000	848'000	9.5%	10%*	10%
DSR Ermüdungskennwert (20°C)		2'260'000	217'000	9.6%	10%*	10%
Penetration bei 25°C	0.1mm	29.3	0.33	1.1%	<50: 2 (0.1 mm) ≥50: 4%	<50: 2 (0.1 mm) ≥50: 4%
DSR G* bei 40°C	Pa s	219'000	1500	0.69%	5%*	5%
DSR Verformungskennwert (60°C)	Pa	14'400	214	1.5%	5%*	5%
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	59.6	0.3	0.46%	1 1.5 (PmB)	1 1.5 (PmB)
DSR G* bei 70°C	Pa s	3547	103	2.9%	6%*	6%
Umhüllung mit Referenzmineralstoffen	%	47.5	0.5	1.1%	10	10

Tabelle 6: Signifikante Unterschiede für Bindemitteluntersuchungen (*Wiederholpräzision gemäss Empa-Daten)

3.3 Darstellung der wichtigen Resultate in Form eines Spinnendiagramms

Um die Resultate von geschädigtem und nicht geschädigtem Bindemittel möglichst einfach und aussagekräftig aufzuzeigen, wurde die Darstellung in Form eines Spinnendiagrammes gewählt (Abbildung 6). Dadurch lässt sich mit einem Blick feststellen, wo die grössten Unterschiede auftreten. Die Achsen mit den Bindemittelcharakteristika wurden so angeordnet, dass sie von den Eigenschaften in der Kälte (Brechtspunkt nach Fraass) über die mittleren Gebrauchstemperaturen (Ermüdungskennwert) zu den hohen Temperaturen (Erweichungspunkt Ring und Kugel) führen. Die Skalierung der Achsen wurde so gewählt, dass innen die schlechten und aussen die guten Werte liegen. Dies führt allerdings dazu, dass einige Achsen nicht in aufsteigender, sondern absteigender Reihenfolge vorliegen. So läuft die Skala für den Brechtspunkt nach Fraass von 0 bis -30°C, da ein Bitumen einen möglichst tiefen Brechtspunkt nach Fraass haben sollte. Die Achse für den Erweichungspunkt Ring und Kugel fängt nicht bei 0°C an, da dieser Wert für Bitumen nicht

vernünftig ist. Hier wurde ein Bereich von 40 bis 90°C für den Erweichungspunkt Ring und Kugel gewählt. Eine andere Skala ist für andere Bitumen gegebenenfalls sinnvoller.

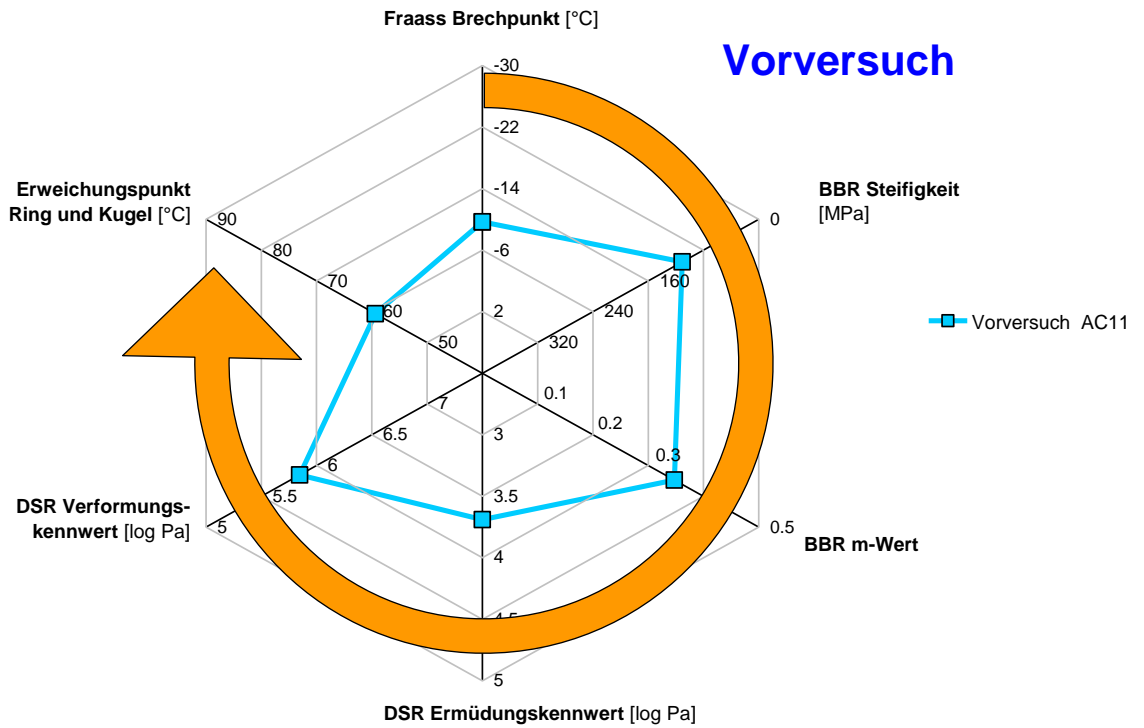


Abbildung 6: Darstellung der Resultate in einem Spinnendiagramm

Für die DSR-Kennwerte wird der dekadische Logarithmus verwendet, da die Werte über mehrere Zehnerpotenzen ändern können. Dies bedeutet, dass beispielsweise ein DSR-Ermüdungskennwert von 1000 als 3 dargestellt wird. Der DSR-Verformungskennwert ist wiederum auf einer absteigenden Achse dargestellt, da dieser nicht zu gross sein darf, beziehungsweise in SHRP ein Maximalwert definiert wurde.

4 Untersuchung der Objekte

EMPA-Bezeichnung des Objektes	Objekttyp	Schadensbild
AG1	Kantonsstrasse	Kornausbruch
AG2	Brückenbelag mit Gussasphalt	Spurrinnen
FR1	Autobahn	Spurrinnen
UR1	Autobahn	Rissbildung
UR2	Autobahn	Verschiebungen
LU1	Brücke	Risse

Tabelle 7: Übersicht über die untersuchten Objekte

4.1 Objekt AG1



Abbildung 7: Kantonsstrasse nach Gansingen im Kanton AG1

4.1.1 Beschreibung

Ort	Kantonsstrasse K 287 bei Gansingen (AG)
Schadensbild	Kornausbruch auf einer Spur, vor allem gegen die Mitte zu (Abbildung 8)
Referenzstrecke	gleiche Strasse, Gegenrichtung
Belagsaufbau/Zusammensetzung	AB 11N, 40 mm mit Bitumen B80/100 TA 10, 20 mm mit TB 2000? teilweise HMT + OB Planie oder Schotter
Bindemittel der Deckschicht	B80/100 (ohne Trinidad)
Belagseinbau	2.9.1996, 1. Spur am Morgen, 2. Spur am Nachmittag



Abbildung 8: Unten: Belag mit Kornausbruch, oben: intakte Gegenfahrbahn

4.1.2 Probenahme

Probenahme durchgeführt durch Kt. Aargau (Hr. Röthlisberg) in Anwesenheit der Empa

Datum: 13.3.2002

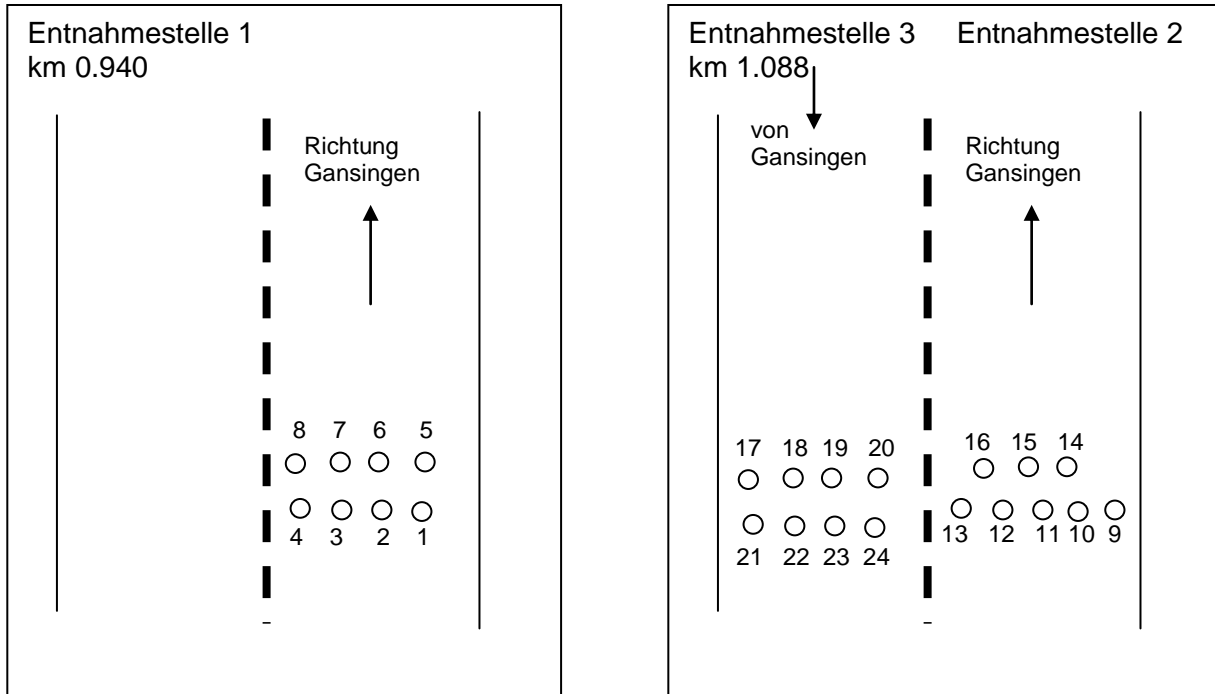


Abbildung 9: Entnahmeplan für Objekt 1

- | | |
|-------------|--|
| 1. Entnahme | Fahrtrichtung Gansingen, Kilometer 0.940, Stelle unbeschädigt, BK 1-8 (Set A) |
| 2. Entnahme | Fahrtrichtung Gansingen, Kilometer 1.088, Stelle beschädigt, BK 9 - 16 (Set B) |
| 3. Entnahme | Fahrtrichtung Bürersteig, Kilometer 1.088, Stelle unbeschädigt (gegenüber von 2. Entnahme auf anderer Fahrspur) , BK 17 – 24 (Set C) |

4.1.3 Resultate

Prüfresultate für Bohrkernuntersuchung

Prüfmethoden	Einheit	AG1 Set B (geschädigt)	AG1 Set C (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Bohrkern-Nr gemäss Entnahmeplan		10-12	17-19		
Bindemittelgehalt	Masse-%	5.39%	5.86%	0.23	++
Hohlraumgehalt	Vol.-%	8.4	5.4	1.5	++
Siebdurchgang bei 1 mm	Masse-%	29.8	30.5	0.3	-
Fillergehalt	Masse-%	10.4	11.0	0.3	-

Tabelle 8: Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen

Prüfresultate für Bindemittelsuchung

Prüfmethode	Einheit	AG1 Set B (geschädigt)	AG1 Set C (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Fraass	°C	-12	-15	1.9	-
BBR Steifigkeit 12°C	MPa	161.0	89.9	28%	++
BBR m-Wert		0.361	0.407	6.0%	+
DSR G* bei 10°C	MPa	21.0	13.2	23%	++
DSR Ermüdungs- kennwert f (20°C)	MPa	4.026	2.30	27%	++
Penetration bei 25°C	0.1 mm	nb	nb		
DSR: G* bei 40°C	kPa	247	97.0	44%	++
DSR: Verformungs- kennwert (60°C)	Pa	1300	2730	65%	++
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	59.1	53.6	2.8	++
DSR G* bei 70°C	Pa	3470	1420	42%	++
Umhüllung mit Refe- renzmineralstoffen		67%	41%	24%	++

Tabelle 9: Resultate der Bindemitteluntersuchungen am rückgewonnenen Bindemittel des Objektes AG1 (nb: nicht gemessen)

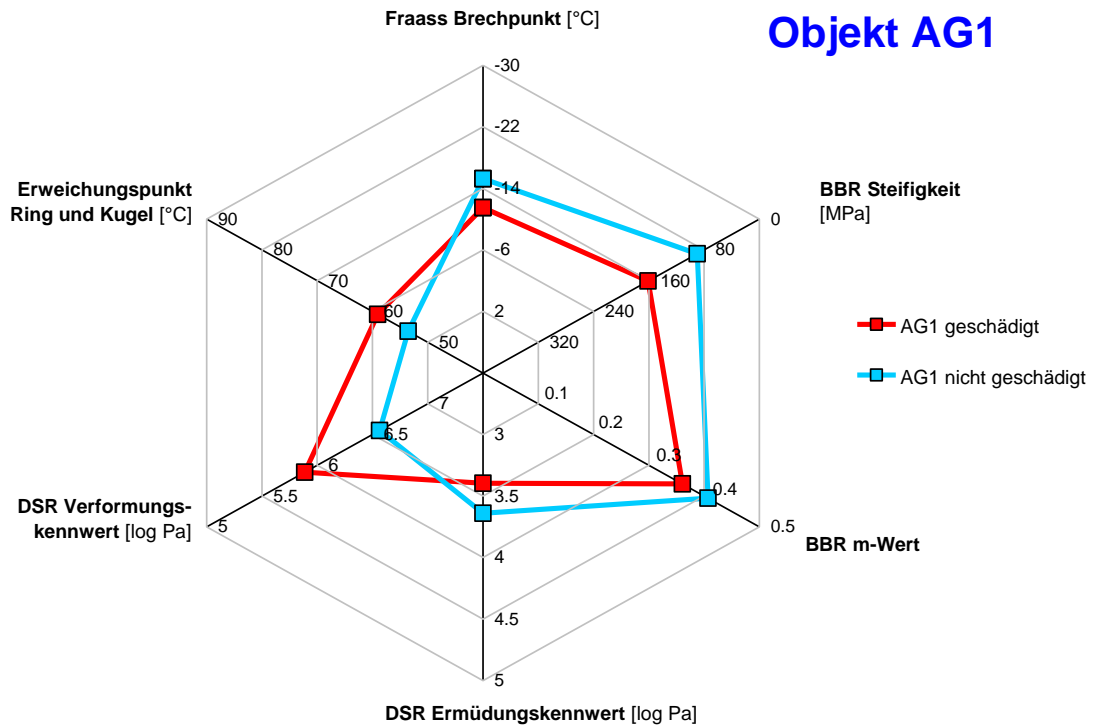


Abbildung 10: Resultate des Objektes AG1 dargestellt im Spinnendiagramm

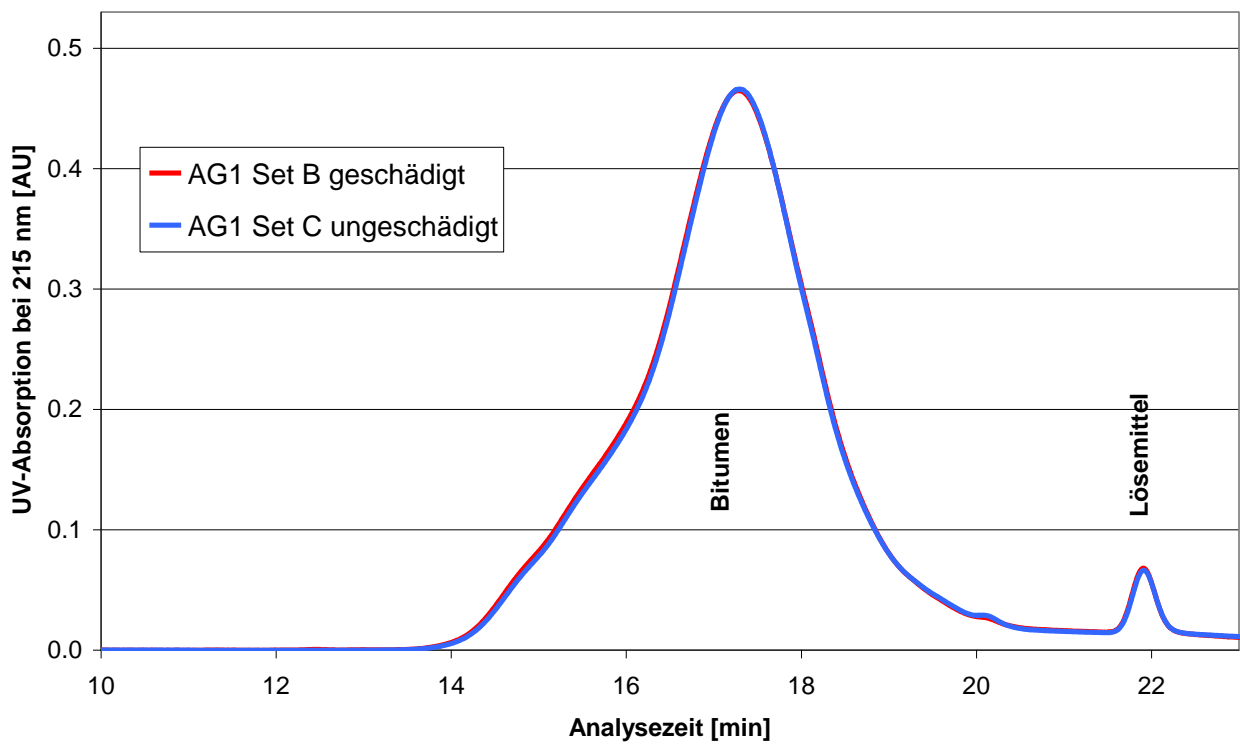


Abbildung 11: GPC-Chromatogramm für das Objekt AG1

4.1.4 Diskussion

Die Bohrkerne an der geschädigten Stelle wiesen einen deutlich höheren Hohlraumgehalt auf als die Referenzproben der ungeschädigten Stelle. Dies ist aber teilweise auf die ausgebrochenen Mineralstoffe zurückzuführen, wodurch zusätzliche Hohlräume entstehen. Allgemein kann bei den Proben aus dem geschädigten Teil eine eindeutige Verhärtung des Bindemittels, sowohl im oberen als auch im unteren Temperaturbereich, festgestellt werden, was im Spinnendiagramm sehr schön zum Ausdruck kommt (Abbildung 1). Dies ist einerseits im Erweichungspunkt Ring- und Kugel, aber auch in den BBR- und DSR-Resultaten ersichtlich, wobei die BBR-Steifigkeit dies deutlicher anzeigt als der Brechpunkt nach Fraass. Die DSR-Schermoduln G^* des Bindemittels der geschädigten und nicht geschädigten Probe unterscheiden sich vor allem bei mittleren und hohen Temperaturen stark voneinander. Diese Versteifung des Bindemittels wird auch durch den Erweichungspunkt Ring und Kugel angezeigt, jedoch in geringerer Masse. Dies zeigt, dass der DSR-Schermodul G^* sehr empfindlich auf Verhärtungen reagiert.

Der Füllergehalt ist mit 11% für einen AB11 relativ hoch. Dadurch wird mehr Bindemittel benötigt, damit eine ausreichende Kohäsion des Mastix (Bindemittel + Filler) erreicht wird. Ein bindemittelarmer Mastix ist einerseits steifer und andererseits poröser, was das Eindringen von Wasser erleichtert. Zudem zeigt ein bindemittelarmer Mastix eine geringere Adhäsion an die grösseren Mineralstoffe. Allerdings wurde zwischen der geschädigten und ungeschädigten Stelle kein grosser Unterschied im Bindemittelgehalt und Füllergehalt festgestellt.

Gemäss mündlichen Informationen des Bauherren war die Verdichtung stellenweise ungenügend. Diese könnte eine direkte Folge des zu harten Bindemittels gewesen sein. Umgekehrt kann die Bindemittelverhärtung auch durch den erhöhten Hohlraumgehalt verursacht worden sein. Darauf deutet Abbildung 8, wo deutlich zu sehen ist, dass der Kornausbruch verstärkt in der Mitte aufgetreten ist. Dies könnte auf eine ungenügende Verdichtung in der Strassenmitte zurückzuführen sein, was von Zeit zu Zeit vorkommt, wenn eine Deckschicht auf eine gegebene Höhe einer bestehenden Fahrbahn eingebaut werden muss. Leider sind keine Resultate von Bindemitteluntersuchungen an Bohrkernen beim Einbau vorhanden, um diese Hypothese zu bestätigen.

Der Umhüllungsgrad ist bei der geschädigten Stelle höher, was auf den ersten Blick erstaunt. Der Umhüllungsgrad ist aber direkt von der Bindemittelhärte abhängig: je härter das Bindemittel desto höher wird der Umhüllungsgrad. Deshalb ist die Erhöhung des Umhüllungsgrades vermutlich ebenfalls auf die Bindemittelverhärtung zurückzuführen. Die GPC-Chromatogramme der beiden Proben sind nicht voneinander zu unterscheiden. Dies ist nicht erstaunlich, da diese Methode unterschiedliche Viskositäten nicht

nachzuweisen vermag, wenn sie nicht durch einen höheren Asphaltanteil verursacht werden, was offensichtlich nicht der Fall war. Eine starke Überhitzung des Bindemittels ist hingegen mittels GPC in der Regel sichtbar, was in diesem Fall deshalb ausgeschlossen werden kann.

4.2 Objekt AG2



Abbildung 12: Objekt AG2: Brücke über die Limmat bei Obersiggenthal

4.2.1 Beschreibung

Ort	Obersiggenthal (Kanton AG)
Schadensbild	Spurrinnen im Brückenbelag noch vor Inbetriebnahme
Referenzstrecke	mittlere Röhre Bareggunnel
Belag	Deckschicht: GA 11
Bindemittel	Grisolast +2% Trinidad



Abbildung 13: Spurrinnen bei frisch hergestelltem Gussasphalt des Objektes AG2

4.2.2 Probenahme

Probenahme durch Empa (Mischgut während dem Einbau)

Datum 16.5. 2002

Referenzstrecke 3. Röhre Baregtunnel:

Probenahme durch Kt. Aargau (Mischgut während dem Einbau)

Datum 13.3.2003

4.2.3 Resultate

Prüfresultate für Mischgutuntersuchung

Prüfmethode	Einheit	AG2 Set A (geschädigt)	AG2 Set B (unbeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Bindemittelgehalt	Masse-%	6.32	6.93	0.3	++
Hohlraumgehalt	Volumen-%	nb*	nb*		
Siebdurchgang bei 1 mm	Masse-%	40.7	39.4	0.65	-
Fillergehalt	Masse-%	23.9	24.1	0.4%	-

Tabelle 10: Mischgutuntersuchung Objekt AG2 (*nb nicht bestimmt, da Proben keine Bohrkernproben waren, sondern beim Einbau Gussasphaltproben ab Lastwagen entnommen wurde)

Prüfresultate für Bindemitteluntersuchung

Prüfmethode	Einheit	AG2 Set A (geschädigt)	AG2 Set B (unbeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Fraass	°C	nb	nb		
BBR Steifigkeit - 12°C	MPa	147	103	18%	+
BBR m-Wert		0.370	0.380	1.3%	-
DSR G* bei 10°C	MPa	26.4	24.3	4.0%	-
DSR Ermüdungskennwert (20°C)	MPa	4.69	4.36	3.6%	-
Penetration bei 25°C	0.1 mm	nb	nb		
DSR G* bei 40°C	kPa	233	204	6.5%	+
DSR Verformungskennwert (60°C)	Pa	16300	16400	0.3%	-
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	69.4	62.7	3.4	++
DSR G* bei 70°C	Pa	4980	4500	5.1%	-

Tabelle 11: Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen am rückgewonnenen Bindemittel des Objektes AG2

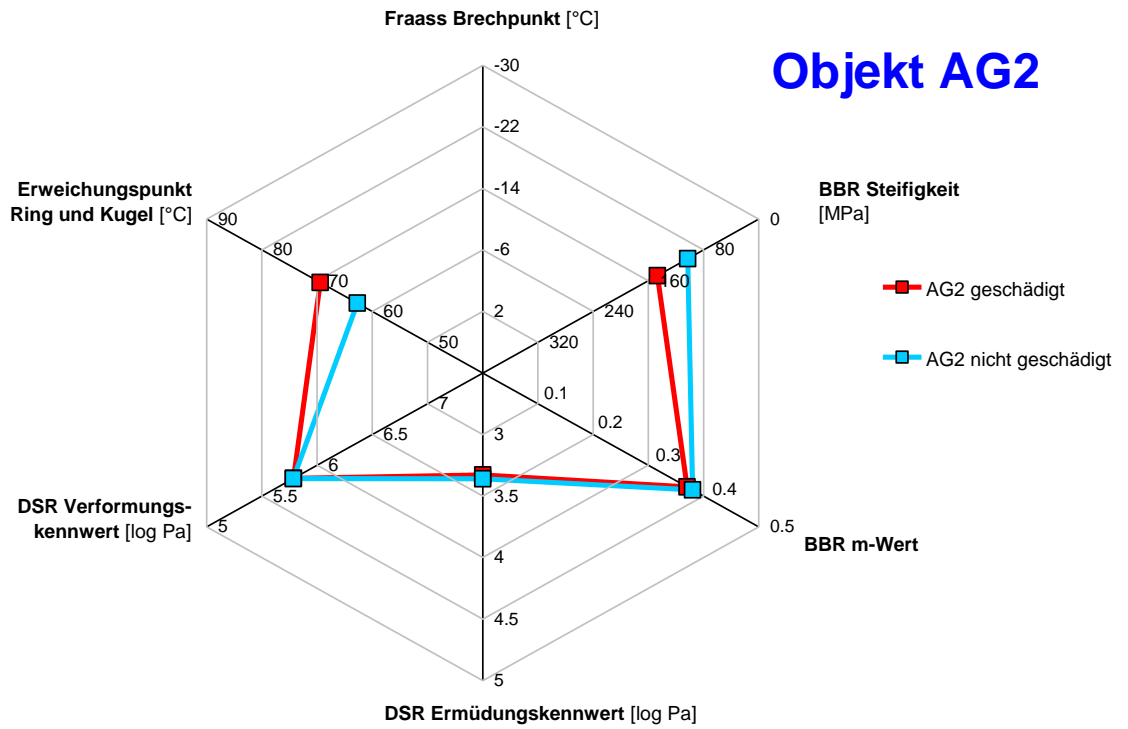


Abbildung 14: Resultate des Objektes AG2 dargestellt im Spinnendiagramm

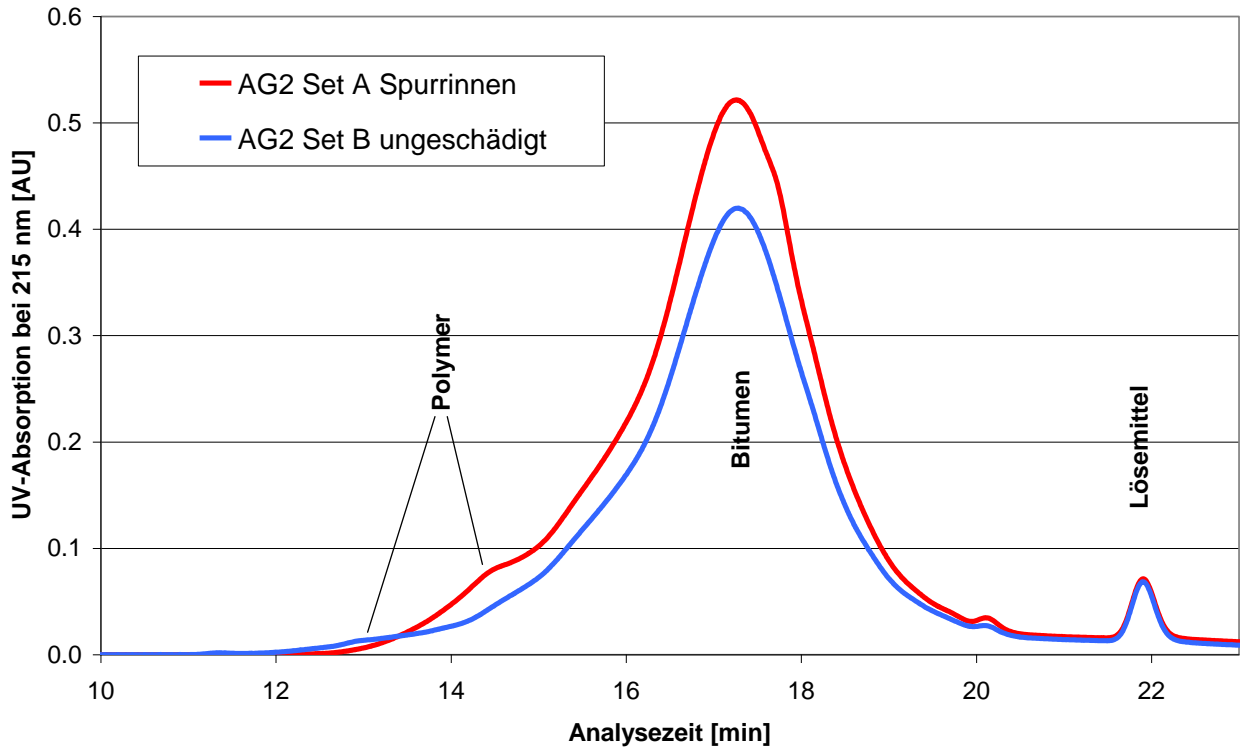


Abbildung 15: GPC-Chromatogramme des rückgewonnenen Bindemittels des Objektes AG 2

4.2.4 Diskussion

Die Resultate der Bindemitteluntersuchung stehen im Widerspruch zu den beobachteten Schäden. Das extrahierte Bindemittel aus den Gussasphaltproben der beschädigten Stelle, wo Spurrinnen aufgetreten sind, zeigt bei hohen Temperaturen eine deutlich höheren Erweichungspunkt Ring und Kugel-Wert als das Bindemittel aus der Referenzprobe. Allerdings unterscheidet sich der Verformungs-Kennwert der beiden Proben nur unmerklich. Auch bei mittleren und tiefen Temperaturen ist das Bindemittel von Set A steifer (BBR, DSR) als bei jenes aus der ungeschädigten Probe von Set B. Allerdings ist dies für das Schadensbild Spurrinnen weniger von Bedeutung. Aus diesen Bindemitteldaten wären deshalb eher Schäden bei der Referenzstrecke zu erwarten gewesen.

Eine Erklärung für das paradoxe Verhalten liefern die GPC-Untersuchungen an den extrahierten Bindemitteln. Die GPC-Chromatogramme der geschädigten und nicht geschädigten Probe (Abbildung 15) unterscheiden sehr stark voneinander, sowohl bezüglich Grösse des Bitumenpeaks als auch bezüglich des Polymerbereichs. Bei einer Schädigung durch Überhitzung wäre der Bitumenpeak in beiden Proben praktisch identisch, wie dies beim Objekt AG1 (Abbildung 11) der Fall war, wo die Chromatogramme praktisch deckungsgleich übereinander lagen. In der Regel führt eine Überhitzung des Bindemittels lediglich zu einer leichten Verschiebung der linken Seite des Bitumenpeaks nach höherer Molekularmasse, das heisst nach links zu kürzerer Analysezeit. Die überlagerten Chromatogramme in Abbildung 15 des Objektes AG2 unterscheiden sich jedoch so stark, was nur dadurch zu erklären ist, dass es sich bei den beiden Bindemittelproben um zwei ganz unterschiedliche PmB-Produkte handeln muss, vermutlich sogar von verschiedenen Herstellern. Diese Vermutung wurde nach Rückfrage dann auch tatsächlich mündlich bestätigt.

4.3 Objekt FR1



Abbildung 16 Objekt FR1; Blick Richtung Bern

4.3.1 Beschreibung

Ort	Autobahn A12 zwischen Düdingen und Flamatt, Normalspur Fahrrichtung Fribourg bei Messpunkt 67.300
Schadensart	Spurrinnen
Referenzstrecke	gleicher Autobahnabschnitt, Normalspur Fahrrichtung Fribourg, bei Messpunkt 66.000
Belagsaufbau und Sanierungsarbeiten (Abbildung 18):	
	Einbau 1972 : HMT - B, 11 cm Dicke, Bitumen B 60/70 Mavag, 4.2% Bindemittelgehalt
	Einbau 1973 : AB 18S, 7 cm dick, Bitumen B 60/70 Mavag, Bindemittelgehalt 5.75
	Sanierung 1986: Abfräsen, danach Heissrecycling in-place (Remix), darauf neue Deckschicht AB 10S, B 80/100 (Venezuela Bitumen mit 1.75% Trinidad)



Abbildung 17: Spurrinnen in der Normalspur

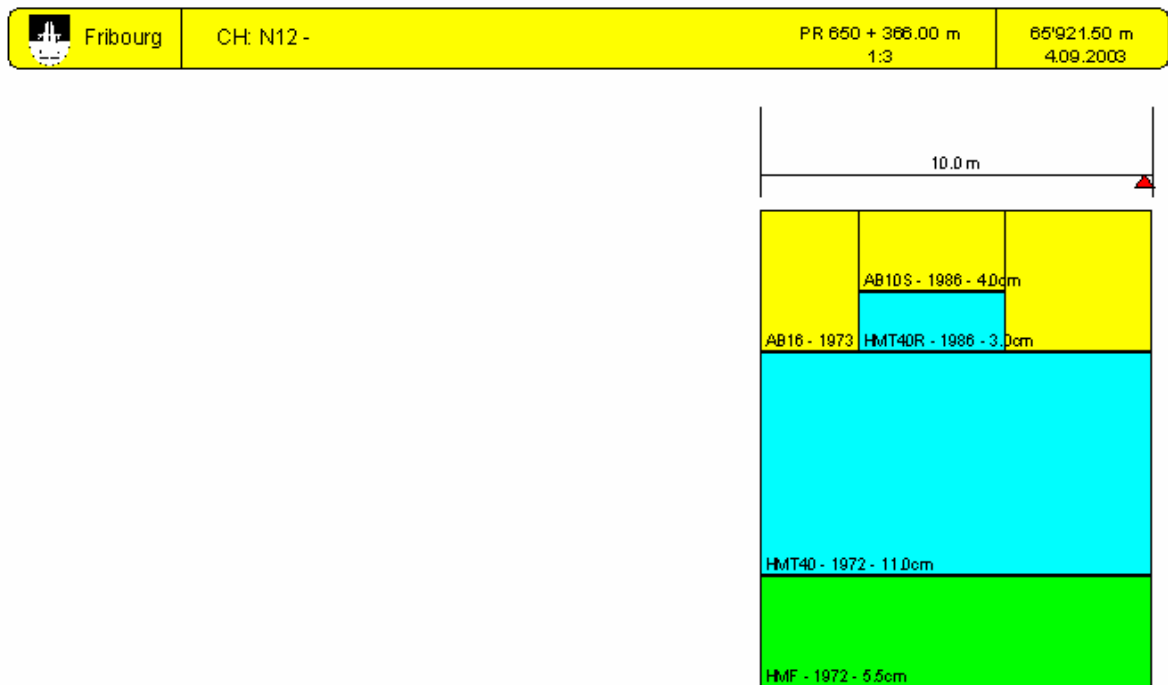


Abbildung 18: Belagsaufbau der Nationalstrasse A 12- Juraseite nach der Sanierung 1986 [37]

4.3.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte während der Gesamtsanierung des Autobahnabschnittes am 1. 9. 2003.

Proben	Bohrkerne 1-8 (Set A)	Bohrkerne 9 - 16 (Set B)
Ort	bei Flamatt Messpunkt 67.300	bei Flamatt Messpunkt 66.000
Fahrspur	Normalspur Richtung Fribourg (Juraseite)	
Spurrinnentiefe	2 - 3 cm	< 1 cm

Tabelle 12: Probenahme am Objekt FR1



Abbildung 19: Probenahme am Objekt FR1

4.3.3 Resultate der Deckschicht

Prüfresultate für Bohrkernuntersuchung

Prüfmethode	Einheit	FR1 Set A (Spurrinnen)	FR1 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Bindemittelgehalt	Masse-%	5.6	5.76	0.08	-
Hohlraumgehalt	Volumen-%	2.6%	3.3%	0.35	-
Fillergehalt	Masse-%	8.9	9.3	0.2	-
Siebdurchgang 1 mm	Masse-%	31.7	32.7	0.5	

Tabelle 13: Bohrkernuntersuchung Objekt FR1

Prüfmethode	Einheit	FR1 Set A (Spurrinnen)	FR1 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Fraass	°C	nb	nb		
BBR Steifigkeit -12°C	MPa	103	103	0.0%	-
BBR m-Wert		0.386	0.385	0.1%	-
DSR G* bei 10°C	MPa	16.7	17.2	1.6%	-
DSR Ermüdungs- kennwert (20°C)	MPa	3.76	3.40	5.0%	-
Penetration bei 25°C	0.1 mm	nb	nb		
DSR G* bei 40°C	kPa	11.4	10.4	4.8%	-
DSR Verformungs- kennwert (60°C)	Pa	8340	7480	5.5%	+
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	56.0	56.2	0.1	-
DSR G* bei 70°C	Pa	1580	1450	4.3%	-

Tabelle 14: Bindemittelresultate des rückgewonnenen Bindemittels des Objektes FR1

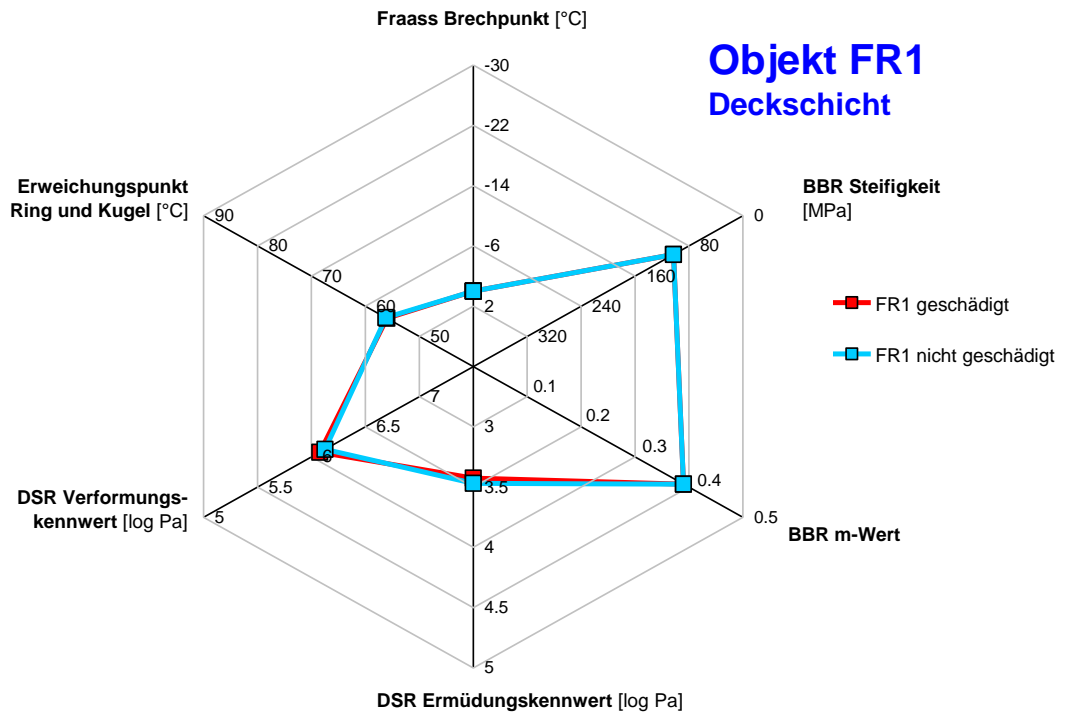


Abbildung 20: Resultate der Deckschicht des Objektes FR1 dargestellt im Spinnendiagramm

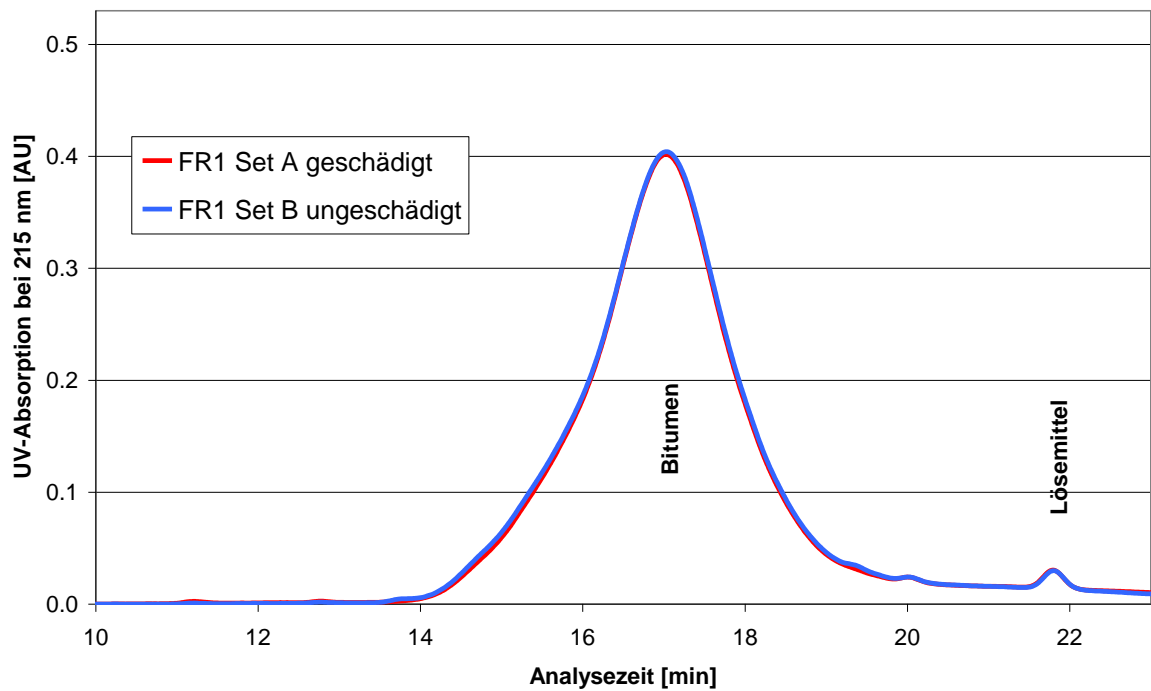


Abbildung 21: GPC-Chromatogramme der extrahierten Bindemittel aus der Deckschicht von Objekt FR1

4.3.4 Diskussion der Resultate der Deckschicht

Die Bindemitteluntersuchung der Bohrkernproben an den beiden beprobten Stellen lässt keine signifikanten Unterschiede erkennen, wie dies im Spinnendiagramm (Abbildung 20) deutlich zum Ausdruck kommt. Sowohl die Resultate der Mischgut- als auch jene der Bindemitteluntersuchungen waren innerhalb der Messunsicherheit identisch. Dementsprechend waren auch die Chromatogramme der Gelpermeations-Chromatographie absolut deckungsgleich.

Beim Schadenbild Spurrinnen ist jedoch nicht immer die Deckschicht die fehlerhafte Schicht, die Ursache liegt oft in einer der tiefer liegenden Schichten. Die fehlerhafte Schicht wird in der Regel aus dem Verlauf der Schichten im Querprofil ermittelt, am besten aus einem Belagsausschnitt. Auch Bohrkern können Hinweise liefern, wenn sie in einer Linie quer zur Spurrinne entnommen und nivelliert eingemessen werden. Im vorliegenden Fall lag aber das Problem vor, dass die Schichtgrenze zwischen Deckschicht und Tragschicht bei den Bohrkernen nicht mit genügender Sicherheit feststellbar war. So konnte nicht eruiert werden, welche Schicht für die Verformung verantwortlich ist. Deshalb wurde entschieden, die darunterliegende Tragschicht zu prüfen, um bestimmen zu können, ob dort der Grund für die Spurrinnenbildung liegt.

4.3.5 Resultate der Tragschicht

Prüfresultate für Bindemitteluntersuchung

Prüfmethode	Einheit	FR1-T Set A (geschädigt)	FR1-T Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Fraass	°C	nb	nb		
BBR Steifigkeit -12°C	MPa	108	146	15%	+
BBR m-Wert		0.450	0.400	5.9%	+
DSR G* bei 10°C	MPa	18.5	22.5	9.9%	-
DSR Ermüdungs- kennwert (20°C)	MPa	2.93	3.54	9.5%	-
Penetration bei 25°C	0.1 mm	nb	nb		
DSR G* bei 40°C	kPa	92.4	113	10%	++
DSR Verformungs- kennwert (60°C)	Pa	4080	7420	29%	++
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	52.8	54.8	1.0	+
DSR G* bei 70°C	Pa	1060	1190	5.6%	-

Tabelle 15: Resultate der Bindemitteluntersuchungen der Tragschicht des Objektes FR1

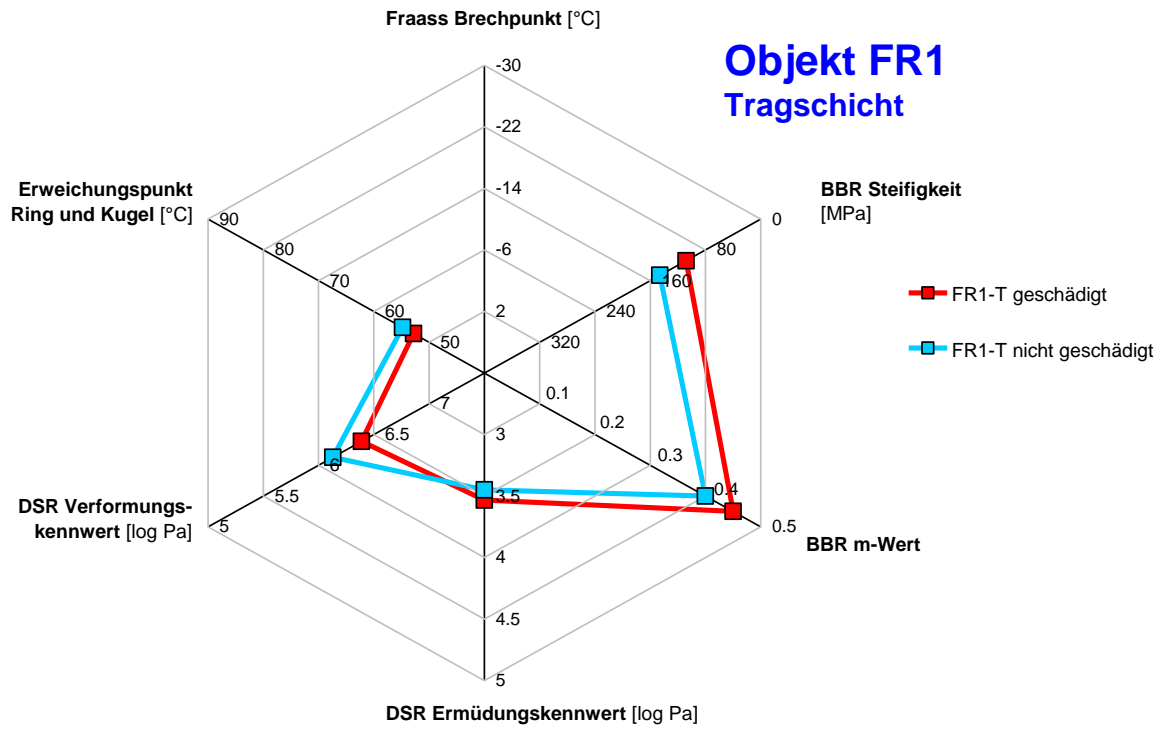


Abbildung 22: Resultate der Tragschicht des Objektes FR1 dargestellt im Spinnendiagramm

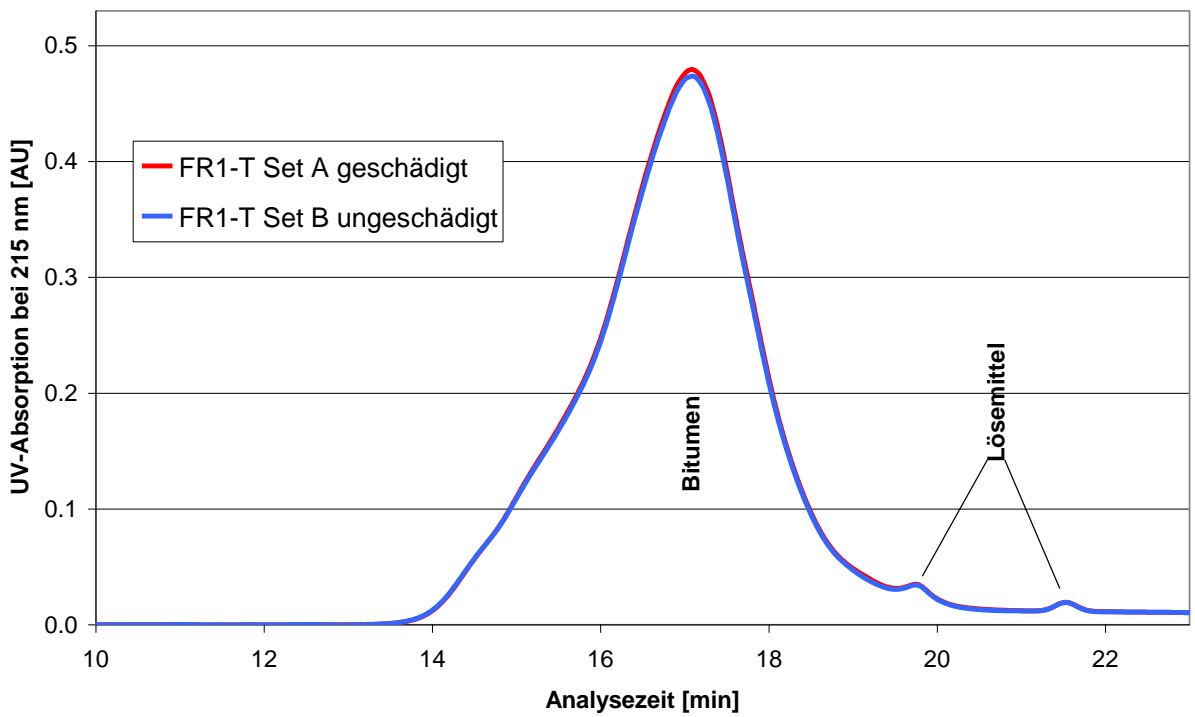


Abbildung 23: GPC-Chromatogramme der extrahierten Bindemittel aus der Tragschicht von Objekt FR1

4.3.6 Diskussion der Resultate der Tragschicht

Im Gegensatz zur Deckschicht konnte in der Tragschicht festgestellt werden, dass am Ort mit der grösseren Spurrinnentiefe das Bindemittel deutlich weicher war. Der Erweichungspunkt Ring und Kugel, sowie der Modul bei 70°C unterscheiden sich nicht sehr deutlich, der Verformungskennwert bei 60°C hingegen zeigt eine klare Differenz zwischen geschädigter und nicht geschädigter Probe. In den GPC-Chromatogrammen ist wiederum kein Unterschied feststellbar, was zeigt, dass die unterschiedliche Härte nur geringen Einfluss auf die Molekulargewichtsverteilung der Bitumenkomponenten hat.

4.4 Objekt UR1

4.4.1 Beschreibung

Ort:	Nationalstrasse A2, Abschnitt Wassen-Göschenen
Schadensbild:	Netzrisse
Referenzstrecke:	selbe Strecke
Belagsaufbau:	Deckschicht: SMA 11, obere und untere Tragschicht: HMT 22
Bindemittel:	Deckschicht: Bitumen 70/100 und Trinidadzusatz obere Tragschicht BP Struktur, untere Tragschicht B80/100



Abbildung 24: Risse in der Deckschicht des Objektes UR1

4.4.2 Resultate

Prüfresultate für Bohrkernuntersuchung

Prüfmethode	Einheit	UR1 Set A (Risse)	UR1 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Bindemittelgehalt	Masse-%	6.2	6.5	0.15	+
Hohlraumgehalt	Volumen-%	nb	nb		
Fillergehalt	Masse-%	11.4	10.8	0.3	-
Siebdurchgang 1 mm	Masse-%	20.2	19.9	0.15	-

Tabelle 16: Resultate der Bohrkernuntersuchungen für Objekt UR1

Prüfresultate für Bindemitteluntersuchung

Prüfmethode	Einheit	UR1 Set A (Risse)	UR1 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Fraass	°C	-8	-8	0.0	-
BBR Steifigkeit - 12°C	0.1 mm	118	104	6.3%	-
BBR m-Wert		0.350	0.363	1.8%	-
DSR G* bei 10°C	MPa	21.6	21.3	6.0%	-
DSR Ermüdungs- kennwert (20°C)	MPa	4.66	4.08	6.6%	-
Penetration bei 25°C	0.1 mm	36	41	6%	+
DSR G* bei 40°C	kPa	251	161	22%	++
DSR Verformungs- kennwert (60°C)	Pa	14900	9330	23%	++
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	56.6	55.0	0.8	-
DSR G* bei 70°C	Pa	3560	2370	20%	++

Tabelle 17: Resultate der Bindemitteluntersuchungen am Objekt UR1

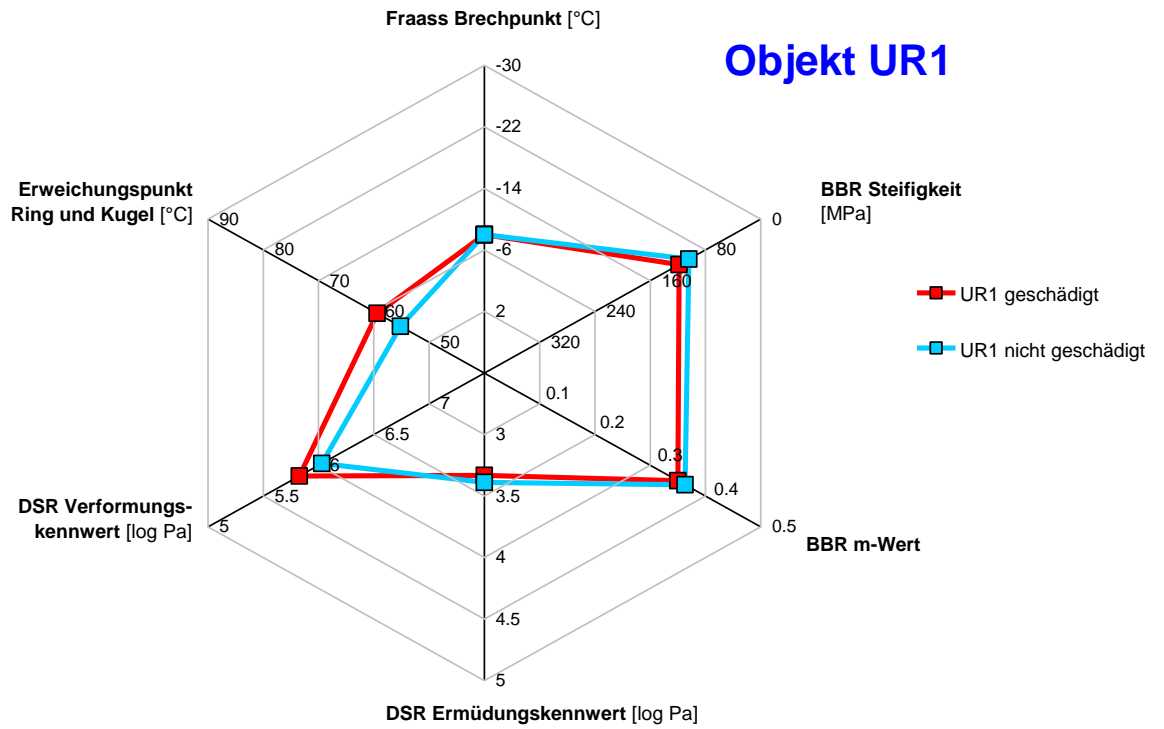


Abbildung 25: Resultate des Objektes UR1 dargestellt im Spinnendiagramm

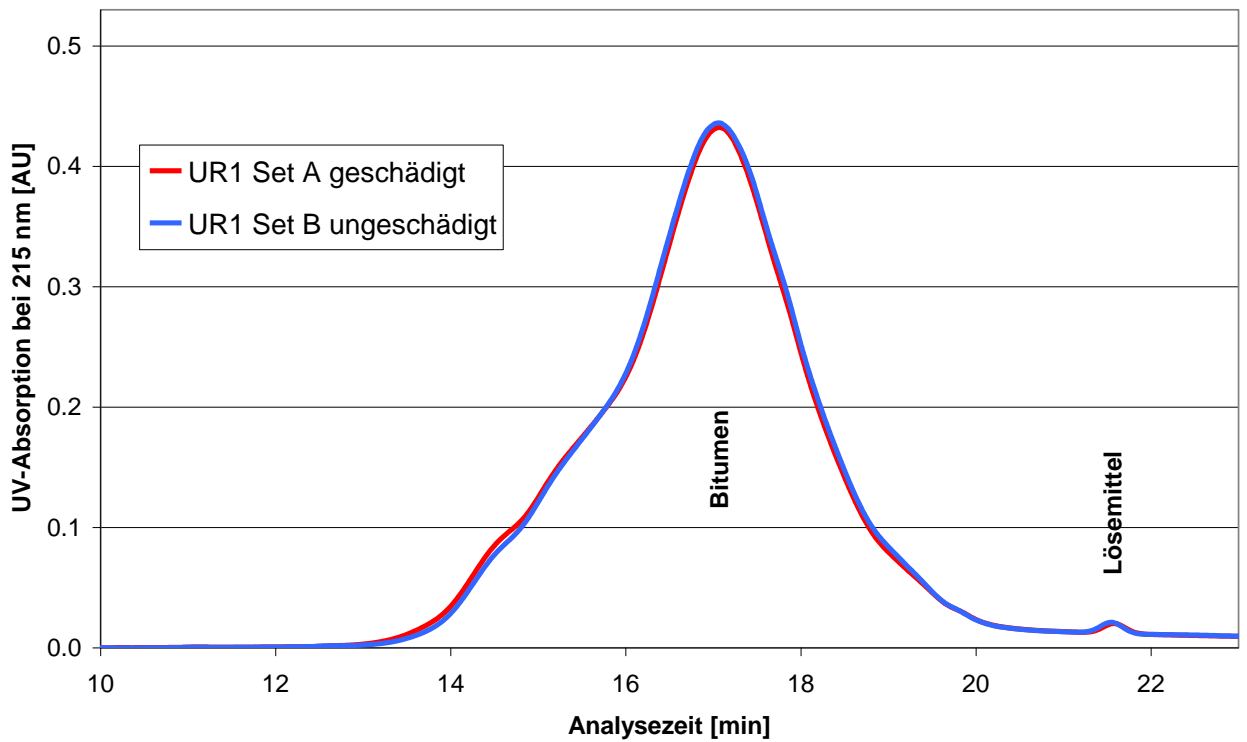


Abbildung 26: GPC-Chromatogramme der extrahierten Bindemittel von Objekt UR1

4.4.3 Diskussion der Resultate

Das Bindemittel an der geschädigten Stelle ist in der Regel etwas härter als jenes der unbeschädigten Proben. Bei den Tieftemperatureigenschaften, namentlich Brechpunkt nach Fraass und BBR-Werte, sind hingegen keine signifikanten Unterschiede, feststellbar. Beim Ermüdungskennwert ist ein Unterschied feststellbar. Grösser sind die Abweichungen aber bei höheren Temperaturen ab 40°C sowohl mit den konventionellen Prüfmethode als auch mit der performance-orientierten Methode DSR.

4.5 Objekt UR2

4.5.1 Beschreibung

Ort:	Nationalstrasse A2, Abschnitt Wassen-Göschenen
Schadensbild:	Schiebungen (Abbildung 27)
Referenzstrecke:	selbe Strecke
Belagsaufbau:	Deckschicht: SMA 11, obere und untere Tragschicht: HMT 22
Bindemittel:	Deckschicht: Bitumen 70/100 und Trinidadzusatz obere Tragschicht BP Struktur, untere Tragschicht B80/100



Abbildung 27: Schiebungen beim Objekt UR2

4.5.2 Resultate

Prüfresultate für Bohrkernuntersuchung

Prüfmethode	Einheit	UR2 Set A (Schiebungen)	UR2 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Bindemittelgehalt	Masse-%	6.3	6.3	0.0	-
Hohlraumgehalt	Volumen-%	3.8	4.1	0.15	-
Fillergehalt	Masse-%	11.4	10.8	0.3	-
Siebdurchgang 1 mm	Masse-%	20.2	19.9	0.15	-

Tabelle 18: Resultate der Bohrkernuntersuchungen für Objekt UR2

Prüfresultate für Bindemitteluntersuchung

Prüfmethode	Einheit	UR2 Set A (Schiebungen)	UR2 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Fraass	°C	-13	-10	1.5	-
BBR Steifigkeit -12°C	0.1 mm	108	96.0	5.9%	-
BBR m-Wert		0.3	0.4	1.4%	-
DSR G* bei 10°C	MPa	20.4	18.0	6.3%	-
DSR Ermüdungs- kennwert (20°C)	MPa	3.63	3.10	7.9%	-
Penetration bei 25°C	0.1 mm	30.0	37.0	10%	++
DSR G* bei 40°C	kPa	200	161	11%	++
DSR Verformungs- kennwert (60°C)	Pa	8690	7640	6.5%	+
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	59.4	55.2	2.1	++
DSR G* bei 70°C	Pa	2260	1790	12%	++

Tabelle 19: Resultate der Bindemitteluntersuchungen des Objektes UR2

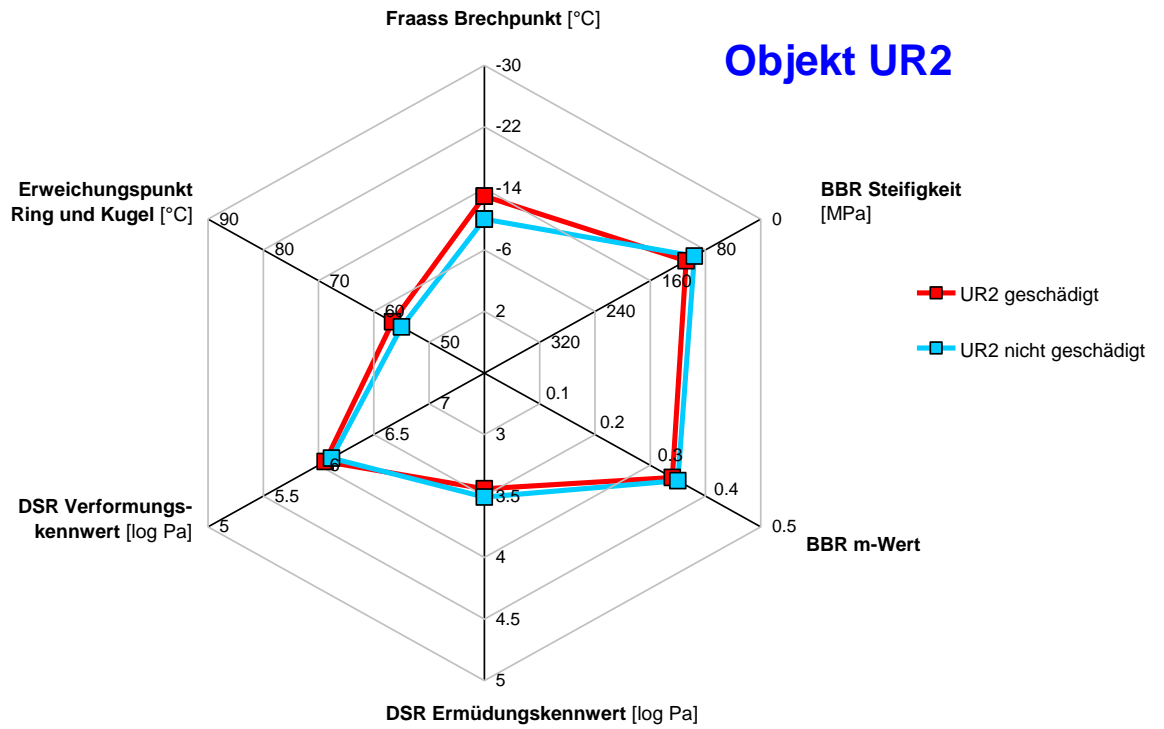


Abbildung 28: Resultate des Objektes UR2 dargestellt im Spinnendiagramm

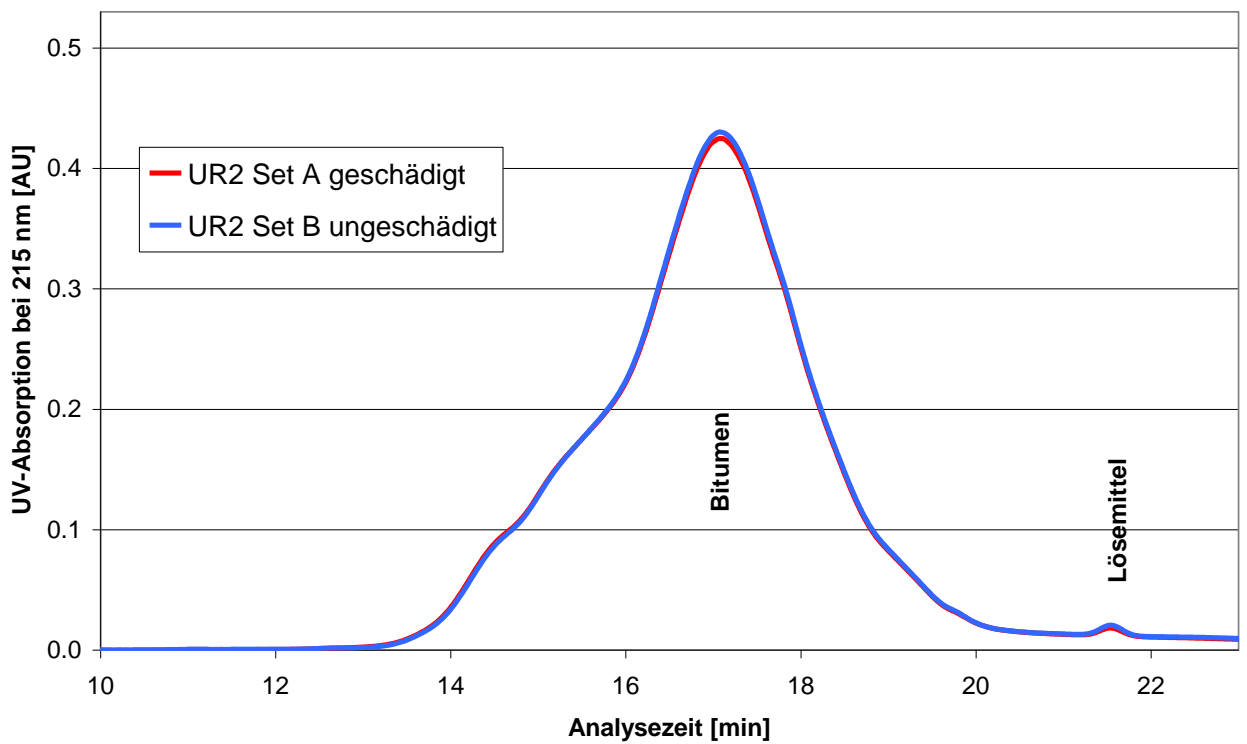


Abbildung 29: GPC-Chromatogramme der extrahierten Bindemittel von Objekt UR2

4.5.3 Diskussion der Resultate

Die erhaltenen Resultate für die Bindemittel sind widersprüchlich. Bei tiefen Temperaturen ist das Bindemittel an der geschädigten Stelle, wo Schiebungen auftraten etwas härter, wie die Resultate von DSR bei 10°C und Fraass zeigen. Für das Schadenbild Schiebung sind aber vor allem die Resultate bei höheren Temperaturen massgebend. Hier zeigen jedoch die Resultate des DSR-Schermoduls bei 40 und 70°C eine höhere Steifigkeit für das Bindemittel an der geschädigten Stelle, was nicht zu erwarten war. Auch der Erweichungspunkt Ring und Kugel-Wert war an der geschädigten Stelle deutlich höher. Der Verformungskennwert zeigt jedoch einen geringeren Einfluss des Bindemittels an

Die Bindemittelresultate lassen den Schluss zu, dass der festgestellte Schaden in Form von Schiebungen nicht dem Bindemittel zugeordnet werden kann. Zusätzliche Untersuchungen an den Bohrkernen zeigten dann auch deutlich, dass vor allem die mangelnde Schichthaftung für den Schaden verantwortlich war. Während an der unbeschädigten Stelle die Abscherprüfung nach Leutner Werte um 30 kN ergaben, zeigten die Bohrkern der geschädigten Stelle zwischen Deck- und oberer Tragschicht überhaupt keinen Verbund.

4.6 Objekt LU1



Abbildung 30: Objekt LU1: Chotten-Kreisel in Sursee (LU)

4.6.1 Objektbeschreibung

Ort:	Sursee, Chotten
Schadensart	Rissbildung
Referenzstrecke	Einfahrt in den Kreisel (vgl. Skizze in Abbildung 32)
Belag (gem. Unterlagen):	AB 11S
Bindemittel	PmB (Vestoplast)
Belageinbau:	Datum unbekannt



Abbildung 31: Risse in der Deckschicht

4.6.2 Probenahme

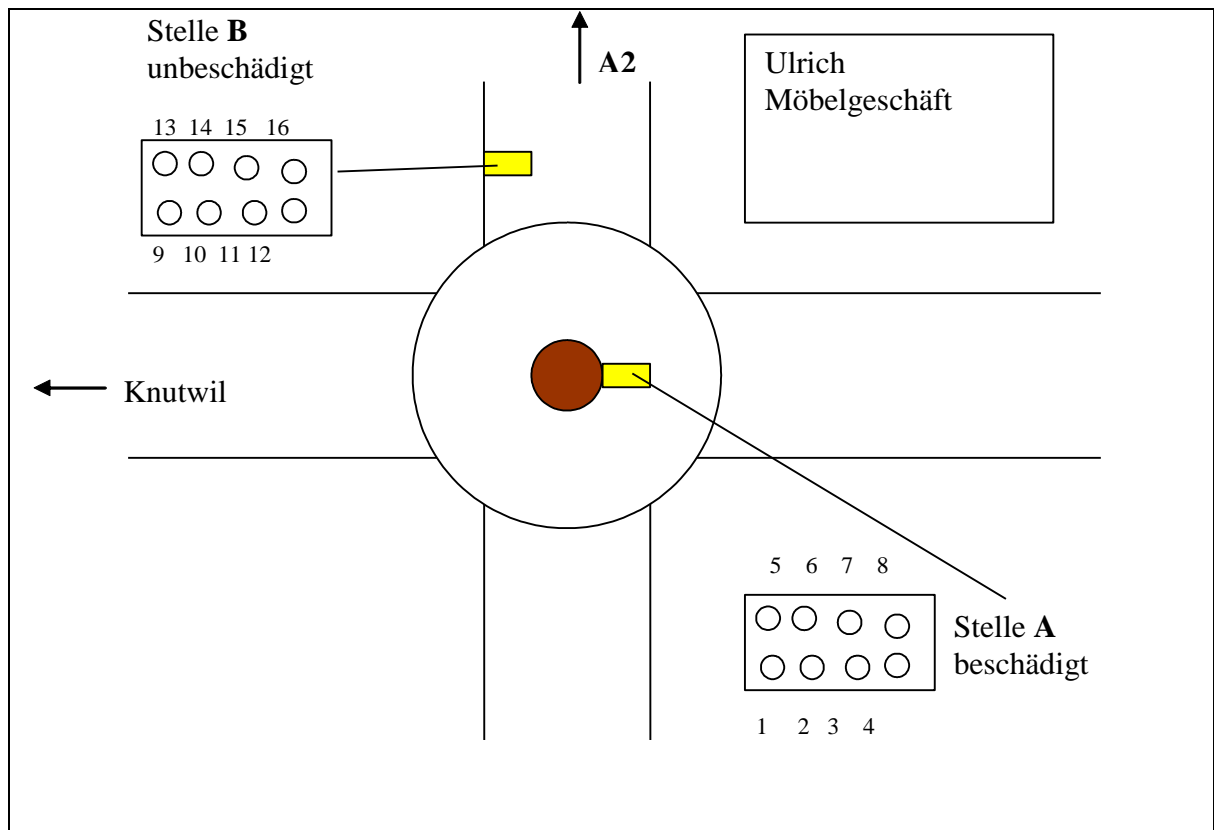


Abbildung 32: Skizze der Probenahme für LU1

Probenahme	durch Kt. Luzern bei Anwesenheit der Empa
Datum	9.4.03
Entnahme Set A	Bohrkerne 1-8 im Kreisels
Entnahme Set B	Bohrkerne 9-16 ausserhalb des Kreisels

4.6.3 Resultate

Prüfresultate für Bohrkernuntersuchung

Prüfmethoden	Einheit	LU1 Set A (geschädigt)	LU1 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Bindemittelgehalt	Masse-%	5.8	5.8	0	-
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5.0	2.4	1.3	++
Siebdurchgang bei 1 mm	Masse-%	26.6	25.3	0.65	-
Fillergehalt	Masse-%	9.4	9.9	0.25	-

Tabelle 20: Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen des Objektes LU1

Prüfresultate für Bindemitteluntersuchung

Prüfmethode	Einheit	LU1 Set A (geschädigt)	LU1 Set B (ungeschädigt)	Abweichung vom Mittelwert	Bewertung
Fraass	°C	-6	-20	7.0	++
BBR Steifigkeit -6°C	MPa	106	21.0	67%	++
BBR m-Wert		0.340	0.400	8.1%	++
DSR G* bei 10°C	MPa	31.2	7.56	61%	++
DSR Ermüdungs- kennwert (20°C)	MPa	6.49	1.39	65%	++
Penetration bei 25°C	0.1 mm				
DSR G* bei 40°C	kPa	721	159	64%	++
DSR Verformungs- kennwert (60°C)	Pa	50400	13000	59%	++
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	71.7	63.4	4.2	++
DSR G* bei 70°C	Pa	13800	3950	56%	++

Tabelle 21: Resultate des rückgewonnenen Bindemittels für das Objekt LU1

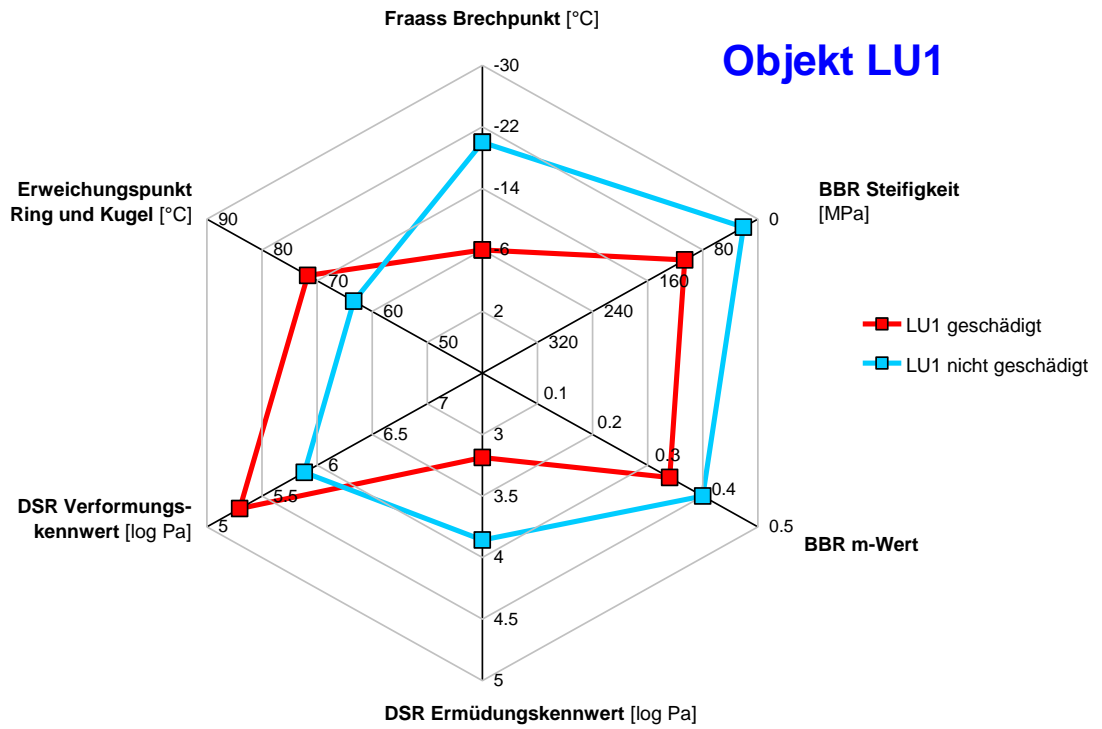


Abbildung 33: Resultate des Objektes LU1 dargestellt im Spinnendiagramm

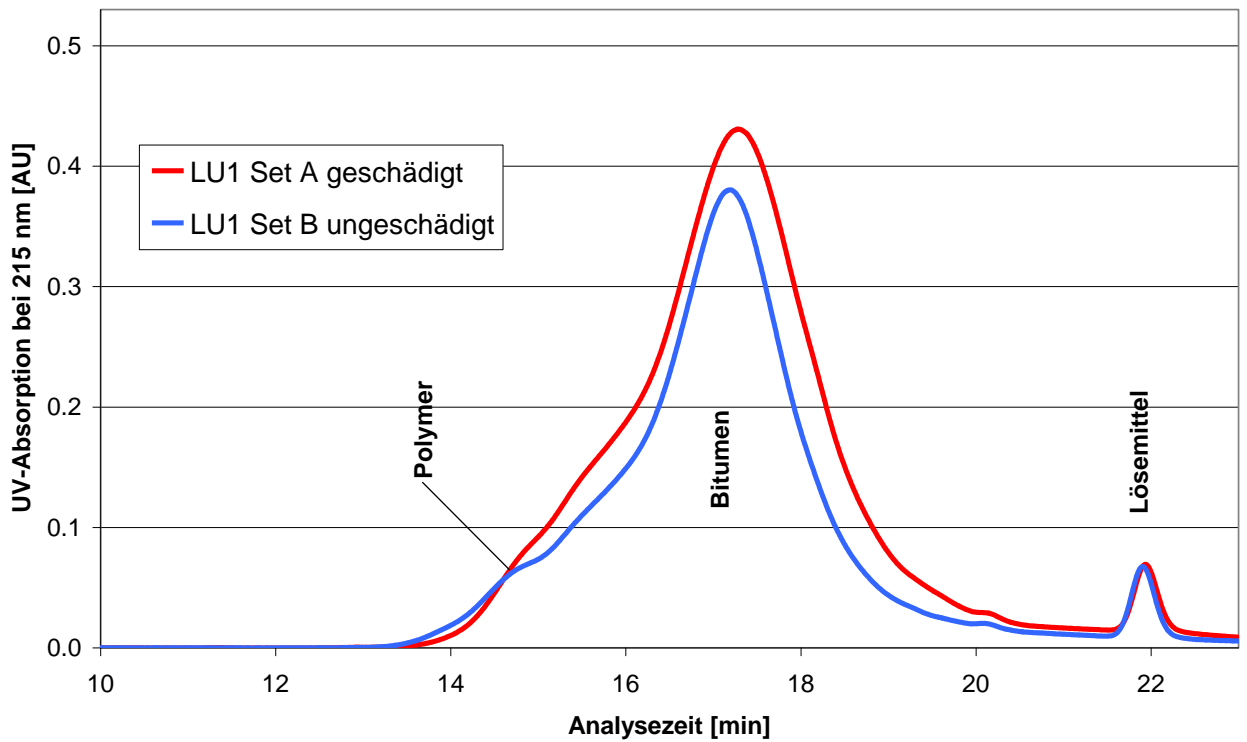


Abbildung 34: GPC-Chromatogramme der extrahierten Bindemittel von Objekt LU1

4.6.4 Diskussion

Die Bohrkern im Kreisel (Set A) weisen beinahe einen doppelt so hohen Hohlraumgehalt auf im Vergleich zu den Bohrkernen die ausserhalb entnommen wurden. Ein Grund dafür könnten die allgemein schwierigeren Einbaubedingungen in einem Kreisel sein. Der Bindemittelgehalt und die Korngrössenverteilung sind praktisch gleich.

Die Bindemittel der beiden Proben von Set A und Set B weisen grosse Unterschiede in ihren Eigenschaften auf. Sowohl bei tiefen als auch bei hohen Temperaturen ist das Bindemittel von Probe Set A deutlich härter. Schon bei der Handhabung der Mischgutproben war das unterschiedliche Verhalten deutlich bemerkbar. Dies zeigen alle Prüfmethode vom Erweichungspunkt Ring und Kugel bis zum DSR. Erwähnenswert ist der ausserordentlich tiefe Wert von 21 MPa für die BBR-Steifigkeit der Probe von Set B.

Mit der Gelpermeations-Chromatographie konnte nachgewiesen werden, dass es sich bei der Schadensursache nicht um eine Verhärtung des Bindemittels durch Überhitzung handelte, sondern dass es sich um zwei unterschiedliche Bindemittel handeln musste. Die Chromatogramme der beiden Bindemittel weichen sehr stark voneinander ab. Bei einer Verhärtung des Bindemittels würde der Bitumenpeak ähnlich sein und auf der linken Seite eine Flanke zeigen, die durch die Bildung von Asphaltene und/oder dem Abbau von Polymeren bei PmB entsteht.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Vergleichende Betrachtung

5.1.1 Schadensbilder, die vorwiegend durch höhere Temperaturen verursacht wurden

Zu diesen Schadensbildern sind vor allem die Spurrinnenbildung und Schiebungen zu zählen, die in Tabelle 22 grau hinterlegt sind.

Objekt	AG1	AG2	FR1-D	FR1T	UR1	UR2	LU1
Belagstyp	AB 11	GA 11	AB 10S	HMT-B	SMA 11	SMA 11	AB 11S
Schadensbild	Korn- ausbruch	Spurrinnen	Spurrinnen	Spurrinnen	Riss- bildung	Schie- bungen	Riss- bildung
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]							
geschädigt	59.1	69.4	56.0	52.8	55.2	56.6	71.7
ungeschädigt	53.6	62.7	56.2	54.8	59.4	55.0	63.4
DSR Komplexer Modul bei 70°C [Pa]							
geschädigt	3470	4980	1580	1060	3560	2260	13800
ungeschädigt	1420	4500	1450	1190	2370	1790	3950
DSR Verformungskennwert bei 60°C [Pa]							
geschädigt	13000	16300	8340	4080	14900	8690	50400
ungeschädigt	2730	16400	7480	7420	9330	7640	13000

Tabelle 22: Zusammenstellung der Bindemittleigenschaften bei höheren Temperaturen

Erweichungspunkt Ring und Kugel

Bezüglich des Erweichungspunktes Ring und Kugel sind keine Aussagen bezüglich einer Limite, ab der Spurrinnen vermehrt auftreten, möglich (Abbildung 35). Vermutlich überwiegen andere Faktoren wie Mischguteigenschaften oder die Qualität des Untergrundes.

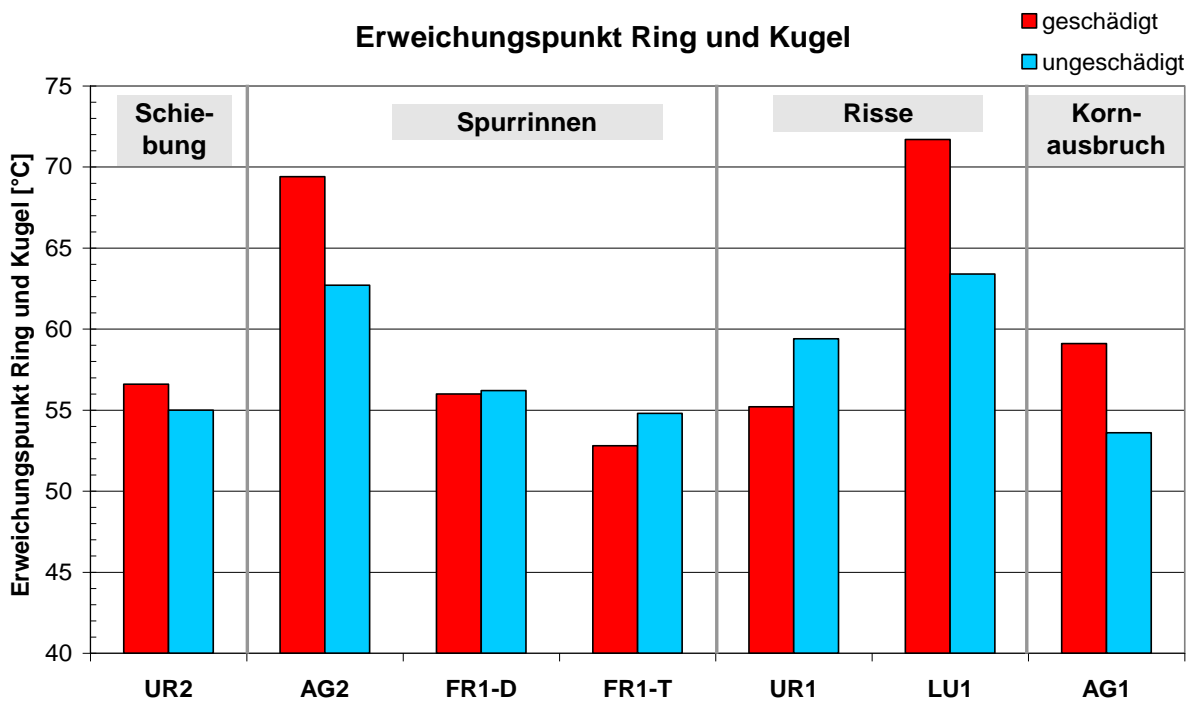


Abbildung 35: Übersicht über die Ring- und Kugelwerte

Verformungskennwert

In SHRP wird für den Verformungskennwert ($G^*/\sin\delta$) ein minimaler Wert von 2200 kPa verlangt. Für eine Temperatur von 60°C ist dieser Wert zu tief, denn alle Objekte zeigen höhere Verformungskennwerte. Die kritische Grenze dürfte eher in der Nähe von 5000 Pa liegen. Es ist aber zu berücksichtigen, dass Schäden wie Spurrinnen oder Schiebungen, die bei höheren Temperaturen entstehen, nicht alleine auf das Bindemittel zurückzuführen sind. Neben dem Kornaufbau und der Schichthftung spielen auch das Ausmass der Verkehrsbelastung, Mikroklima und Belagsaufbau eine wichtige Rolle, so dass im Prinzip nur Proben aus der gleichen Strassenausschnitt vergleichbar sind. Solche Situationen sind aber wie dieses Forschungsprojekt zeigte, selten anzutreffen.

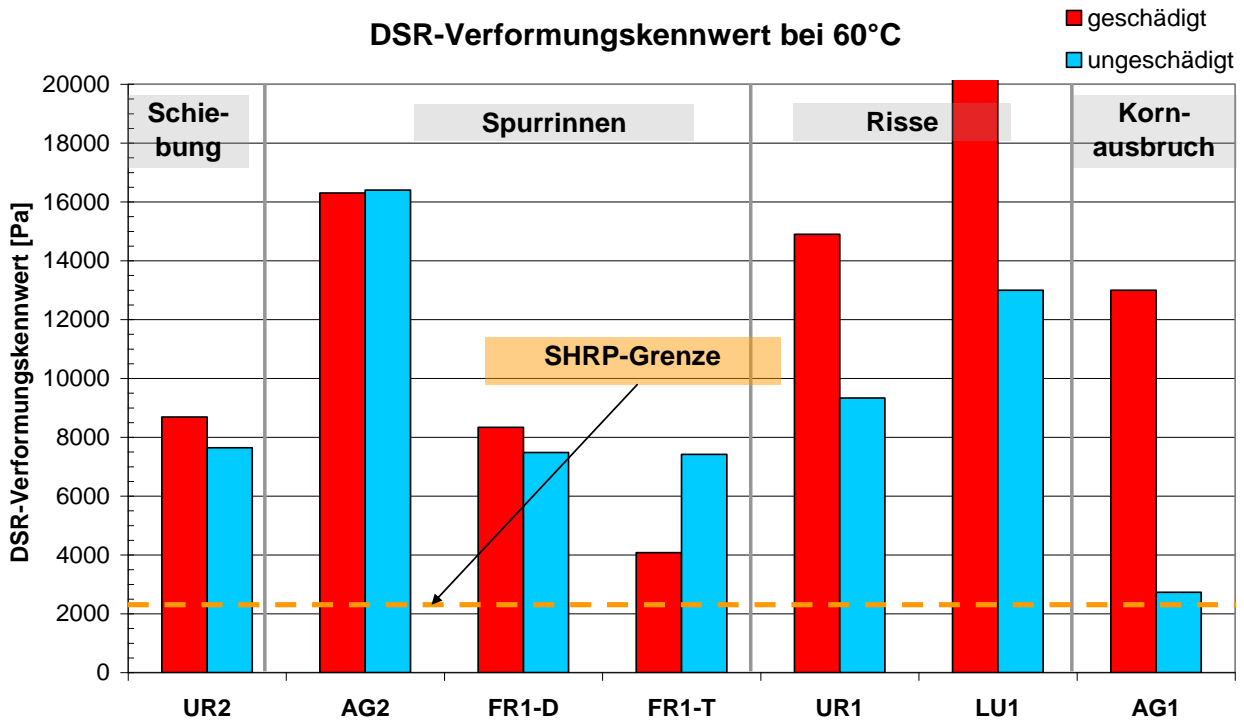


Abbildung 36: Übersicht über die DSR-Verformungskennwerte bei 60°C

5.1.2 Schadensbilder, die vorwiegend durch tiefere Temperaturen verursacht werden

Bei tieferen Temperaturen unterhalb von etwa 0°C sind Kälterisse ein vom Bindemittel hervorgerufenen Schadensbild. Ermüdungsrisse bilden sich oberhalb von 0°C bis etwa 30°C. Risse werden aber nicht immer durch das Bindemittel hervorgerufen, sondern können beispielsweise auch durch eine zu geringe Dimensionierung der Unterlage, respektive zu hoher Verkehrsbelastung hervorgerufen werden können.

Objekt	AG1	AG2	FR1-D	FR1-T	UR1	UR2	LU1
Schadensbild	Kornausbruch	Spurrinnen	Spurrinnen	Spurrinnen	Rissbildung	Schiebungen	Rissbildung
BBR Steifigkeit bei -12°C [MPa]							
geschädigt	161	147	103	108	118	108	106*
ungeschädigt	89.9	103	103	146	104	96.0	21.0*
BBR m-Wert bei -12°C []							
geschädigt	0.361	0.370	0.386	0.450	0.350	0.340	0.340*
ungeschädigt	0.407	0.380	0.385	0.400	0.363	0.350	0.400*
DSR Steifigkeit G* bei 10°C [MPa]							
geschädigt	21.0	26.4	16.7	18.5	26.1	20.4	31.2
ungeschädigt	13.2	24.3	17.2	22.5	23.1	18.0	7.56
DSR Ermüdungskennwert bei 20°C [MPa]							
geschädigt	4.02	4.69	3.76	2.93	4.66	3.63	6.49
ungeschädigt	2.30	4.36	3.40	3.54	4.08	3.10	1.39
Fraass [°C]							
geschädigt	-12	nb	nb	nb	-8	-13	-6
ungeschädigt	-15	nb	nb	nb	-8	-10	-20

Tabelle 23: Zusammenstellung der Bindemittleigenschaften bei mittleren und tiefen Temperaturen (* Werte bei -6°C gemessen)

DSR Ermüdungskennwert bei 20°C

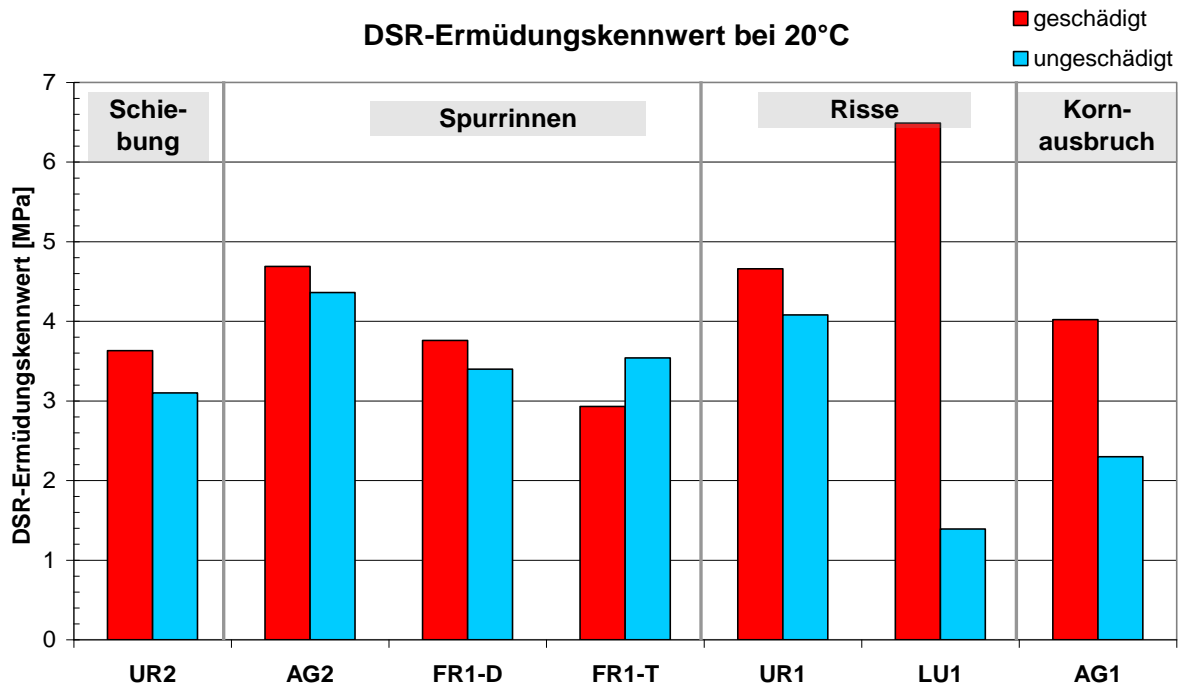


Abbildung 37: Übersicht über die Ermüdungskennwerte bei 20°C

Die schweizerische und europäische Normierung kennt bisher keine Bindemittel-Kennwerte für die Ermüdung. In den USA wurde in SHRP ein mit dem DSR bestimmter Ermüdungskennwert ($G^* \cdot \sin \delta$) definiert, der aus dem komplexen Modul und dem Phasenwinkel berechnet wird. Die kritische Grenze für Ermüdungsrisse wurde in Abhängigkeit der mittleren Temperatur mit 5 MPa festgelegt. Grössere Werte bedeuten ein Risiko zur Bildung von Ermüdungsrisse. In unseren Untersuchungen weist nur die geschädigte Probe von LU1 einen höheren Wert aus. Der Ermüdungskennwert beim Objekt UR1 liegt unterhalb dieses Wertes, wobei es sich hier vermutlich aber nicht um einen Ermüdungsrisse handelt. Da bei SHRP jedoch die Prüftemperatur im Bereich von 0 bis 40°C variiert wird, können die Werte nicht direkt verglichen werden. Für den Verformungskennwert weisen die DSR-Resultate eine gute Differenzierung auf.

BBR-Biegebruchsteifigkeit und m-Wert

Die BBR-Biegebruchsteifigkeit gibt Informationen über die Sprödigkeit des Bindemittels bei tiefen Temperaturen an. Im Gegensatz zum Brechpunkt nach Fraass handelt es sich aber nicht um eine Bruchprüfung sondern um einen Kriechversuch bei tiefen Temperaturen zwischen etwa -30 und 0°C. Bei SHRP ist ein Maximalwert von 300 MPa festgesetzt, aus dem dann die untere Gebrauchstemperatur bestimmt wird. In diesem Projekt wurde mit einer Ausnahme eine feste Temperatur von -12°C gewählt, um die Werte besser vergleichen zu können. Bei den Rissen und beim Kornausbruch haben die geschädigten Bindemittel eine höhere Biegebruchsteifigkeit. Die absoluten Werte sind aber nicht höher als bei anderen Schadensbildern. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass vermutlich bei keinem Objekt Kälterisse aufgetreten sind, was bei der Diskussion der Schadensursache schon vermutet wurde.

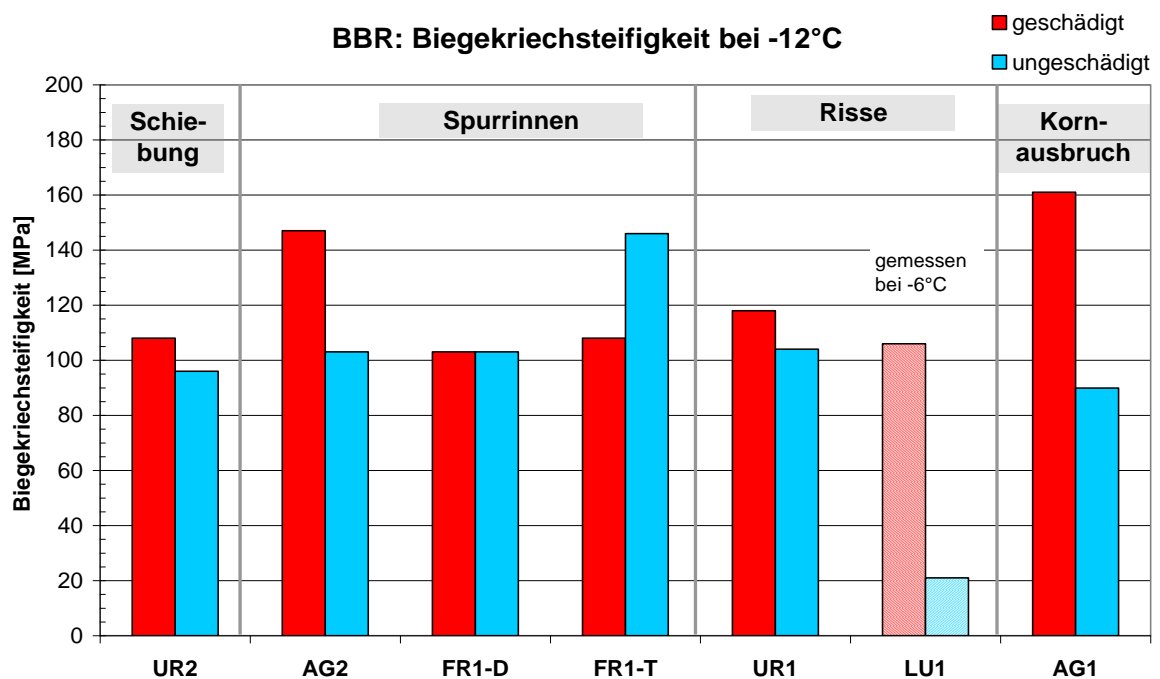


Abbildung 38: Übersicht über die Biegebruchsteifigkeit mittels BBR bei -12°C

Der m-Wert gibt Auskunft über die Steigung der Steifigkeitskurve. Er sollte nach SHRP möglichst gross sein, dies bedeutet, dass das Bindemittel in der Kälte besser relaxieren kann.

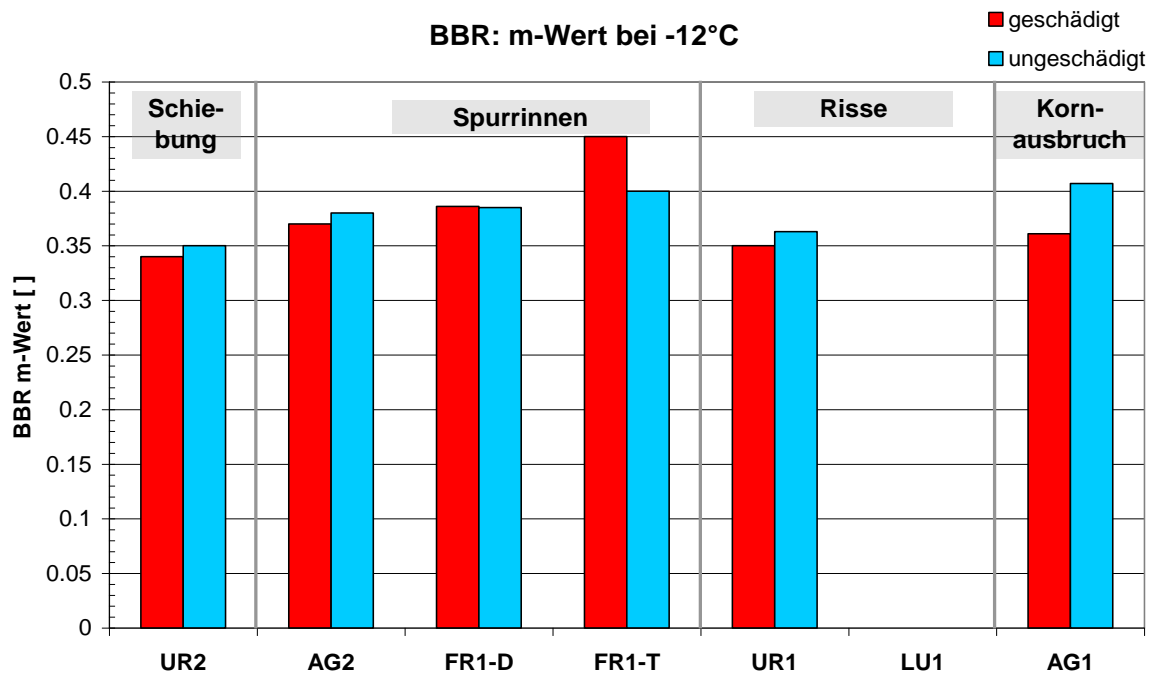


Abbildung 39: Übersicht über die Bestimmung des m-Wertes mittels BBR bei -12°C

Brechpunkt nach Fraass

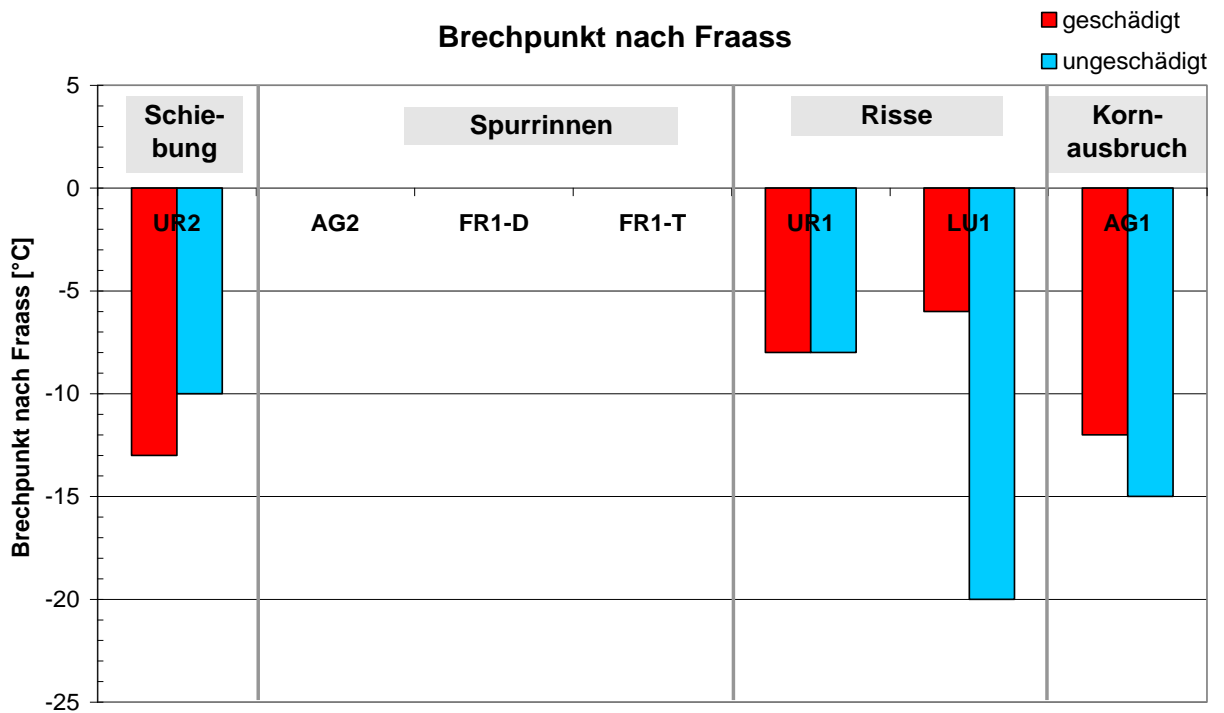


Abbildung 40: Übersicht über den Brechpunkt nach Fraass

Für Objekte, wo Spurrinnen als Schadensbild beobachtet wurden, sind keine Brechpunkte nach Fraass bestimmt worden, da es sich nicht um Schäden handelt, die bei tiefen Temperaturen auftreten. Im Fall von UR1 und AG 1 ist die Differenzierung mittels BBR deutlich besser. Bei UR1 wurde die gleiche Temperatur für den Brechpunkt nach Fraass gemessen, während mittels BBR die geschädigte Probe einen um 15% höheren Wert ergab. Für eine Bestätigung der besseren Differenzierung mittels BBR sind aber mehr Werte notwendig.

5.2 Schlussdiskussion

5.2.1 Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages

Trotz umfangreich durchgeführten Umfragen bei Kantonen und Gemeinden konnten nur wenige Schadenfälle mit vermuteter mangelhafter Qualität des Bindemittels gefunden werden. Damit ist die Zahl der untersuchten Objekte zweifellos zu klein, um eine Korrelation zwischen Schadensbildern und Eigenschaften der Bindemittel ableiten zu können.

Es stellt sich deshalb die Frage, warum nicht mehr Schadenfälle gefunden werden konnten, die auf das Bindemittel zurückzuführen sind. Es kann sicherlich festgehalten werden, dass bei Verwendung von geeigneten Bindemittelsorten der Einfluss von schadhaftem Bindemittel auf die Belageigenschaften überschätzt wurde. Die Verdichtung, mit den Kennwerten Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad, sowie das Mix-design, mit Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung, Mineralstoffeigenschaften und Hohlraumgehalt-Marshall, haben wie die Bindemittelqualität ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Belagsperformance. Dieser Sachverhalt wird durch die vorliegenden Resultate bestätigt.

Im Weiteren ist auch zu berücksichtigen, dass eine Schädigung des Bindemittels, beispielsweise durch Überhitzung bei der Aufbereitung, durch „gute“ Asphalteeigenschaften auch aufgefangen werden kann. Die stärkere Verhärtung und damit vorzeitige Alterung des Bindemittels ist mit den herkömmlichen Bindemitteluntersuchungen bei der Einbaukontrolle kaum festzustellen. Bei gravierenden Bindemittelschädigungen treten Schäden, gemäss Angaben der zuständigen Vertreter der Kantone, in der Regel rasch auf, so dass diese Beläge oft frühzeitig ersetzt werden. Somit standen diese interessanten Schadenfälle für das Forschungsprojekt nicht mehr zur Verfügung.

Bedeutet dies, dass schadhafte Bindemittelqualitäten, die zu Belagsschäden führen, eher selten vorkommen? Diese provokative Frage kann mit diesem Forschungsprojekt nicht abschliessend beantwortet werden. Sicherlich wurde aber der Anteil der Belagsschäden, der eindeutig auf schadhafte Bindemittel zurückzuführen ist, überschätzt. Insbesondere trifft dies auf die Asphaltbetonbeläge mit niedrigem Hohlraumgehalt zu. Bei offenporigen Belägen, wie Drainasphalt oder teilweise Rauasphalt, ist der Einfluss der Bindemittelqualität sicherlich grösser als bei dichten Belägen. Gerade beim Drainasphalt ist ein intakter Bindemittelfilm direkt verantwortlich, ob der Belag standfest ist und ob Gesteinskörner ausgebrochen werden. Allerdings ist auch bei diesen Belägen in der Regel nicht ein mangelhaftes Bindemittel als viel mehr eine falsche Bindemittelwahl die Ursache der Schäden.

Die Frage „Mit welchen Bindemittleigenschaften kann das Risiko von Belagsschäden nachhaltig reduziert werden?“ muss daher so beantwortet werden, dass die Bindemittleigenschaft nur einer von mehreren Faktoren ist, der einen Strassenbelag charakterisiert und deshalb alleine nicht geeignet ist, um das Risiko von Belagsschäden zu beurteilen.

Zusammenfassend hat diese Forschungsarbeit aufgezeigt, dass bei den untersuchten Strecken trotz visuellen Hinweisen sich der Verdacht auf durch Bindemittel verursachte Schäden nicht erhärten liess.

5.2.2 Performance-orientierte Methoden für die Bindemitteluntersuchung

Das Forschungsprojekt ergab wichtige Erkenntnisse über die in der Schweiz erstmals in einem grösseren Umfang angewendeten neuen performance-orientierten Prüfmethode. In diesem Projekt wurden neben Bending Beam Rheometer (BBR) und Dynamic Shear Rheometer (DSR) auch die Gelpermeations-Chromatographie eingesetzt. In den meisten Fällen waren die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen Proben von beschädigter und nicht beschädigter Stelle mit performance-orientierten Prüfmethode deutlicher als mit den herkömmlichen Methoden.

Insbesondere das Dynamic Shear Rheometer (DSR) verfügt über einen grossen Messbereich von mehreren Zehnerpotenzen und benötigt nur etwa 10 g Bindemittel, was bei Prüfungen an Bohrkernen ein grosser Vorteil ist. Da die DSR-Geräte deutlich billiger geworden sind, empfiehlt es sich DSR-Prüfungen für routinemässige Prüfung und damit für die Qualitätssicherung einzusetzen. Entsprechend sind auch für die zukünftigen performance-orientierten Prüfmethode mehrere Prüfungen vorgesehen, die mit diesem Prüfgerät durchgeführt werden können. Im Jahre 2007 wurden die zwei neuen DSR-Messverfahren Zero Shear Viscosity (ZSV) [4] und Equiviscous Temperature (EVT) [5] probenhalber eingeführt, mit denen die Eigenschaften des Bindemittels zukünftig voraussichtlich besser charakterisiert werden können.

Die Bestimmung der Kriechsteifigkeit mit dem Bending Beam Rheometer (BBR) hat gegenüber dem Brechpunkt nach Fraass den Vorteil, dass die Vergleichbarkeit deutlich besser ist [7]. Aus der vorliegenden Forschungsarbeit ergeben sich erste Hinweise, dass auch die Differenzierung der Resultate grösser ist. Bezüglich der Aussagekraft auf die Anfälligkeit auf Kälterisse wurden in verschiedenen Forschungsarbeiten Zweifel geäussert [38, 39]. Insbesondere zeigen polymermodifizierte Bindemittel bei der Kriechsteifigkeit kein besseres Verhalten. Deshalb wurde schon bei dessen Einführung durch SHRP zur Ergänzung der BBR-Kriechsteifigkeit der Direct Tension Test (DTT) empfohlen [40].

Die Gelpermeations-Chromatographie (GPC) erwies sich als überaus nützliche Methode, um unterscheiden zu können, ob das bestellte Bindemittel verwendet wurde oder nicht. Denn das GPC-Chromatogramm kann in vielen Fällen als Fingerprint verwendet werden, insbesondere wenn es darum geht, die heute häufig eingesetzten polymermodifizierten Bitumen zu überprüfen. Hier kann die GPC in der Regel zuverlässig aufzeigen, ob ein PmB oder ein nicht modifiziertes Normalbitumen verwendet wurde. Bei Vorliegen einer Vergleichsprobe kann bei PmB oft auch das Produkt bestimmt werden. Darüber hinaus können mit dieser Prüfmethode Hinweise erhalten werden, ob eine Verhärtung auf eine übermässige thermische Beanspruchung zurückzuführen ist. Allerdings ist zu bemerken, dass bei nicht polymermodifizierten Bitumen dies in der Regel weniger zuverlässig möglich ist, insbesondere wenn sie die selbe Erdölprovenienz aufweisen und sich nur in der Härte, das heisst in der Penetration, unterscheiden.

5.3 Weiterer Forschungsbedarf

Prinzipiell wäre es sinnvoll, diese Arbeit im Rahmen einer statistischen Auswertung von Schadensfällen fortzuführen. Da bei Schadenfällen in der Regel umfangreiche Untersuchungen durchgeführt werden, müssten die meisten Daten vorhanden sein und höchstens einzelne Zusatzuntersuchungen an Bindemittelrückstellproben und aufgearbeitetem Bindemittel wären erforderlich. Dies wären vor allem die performance-orientierte Prüfungen, da die zugehörigen Prüfmittel erst vereinzelt von privaten und kantonalen Strassenbaulaboratorien eingesetzt werden. Daraus könnten langfristig wichtige Informationen über die performance-orientierten Prüfmethoden erhalten werden und um dadurch abschätzen zu können, ob diese tatsächlich eine bessere Differenzierung und höhere Aussagekraft ergeben. Allerdings dürfen diese Schäden nicht nur aus Sicht des Bindemittels angeschaut werden, sondern die Untersuchung sollte das ganze System vom Belag bis zum Klima und der Verkehrsbelastung umfassen.

Die Erfahrung zeigt, dass es oft nicht möglich ist, bei der Betrachtung eines isolierten Schadenfalles die Ursachen einwandfrei zu bestimmen. Bei einer Häufung ähnlicher Schadensbilder können aber durch Vergleich der Daten gewisse Parameter ausgeschlossen werden und so die Schadensursache eingeeengt werden. Die grosse Anzahl von Parametern setzt eine grosse Datenmenge voraus (Datenbank), damit eine statistische Auswertung möglich ist. Es ist zu hoffen, dass durch die Übernahme des Nationalstrassennetzes durch das ASTRA diese Möglichkeit genutzt werden wird und die erforderlichen Mittel für eine Auswertung der Daten zur Verfügung gestellt werden. Allerdings ist diese Aufgabe weniger als Forschungsprojekt sondern vielmehr im Rahmen

einer fortlaufenden Qualitätsüberwachung anzusehen. Es ist deshalb zu überprüfen, ob diese Überwachung nicht als ständige Aufgabe einem unabhängigen Prüflabor übertragen werden sollte. Langfristig würden sich diese Investitionen sicherlich auszahlen, insbesondere wenn dies in ein effektives Qualitätsmanagementsystem integriert würde. Ein wichtiger Punkt wäre aber auch, das daraus erhaltene Wissen an alle Fachleute, insbesondere an die verantwortlichen Organe der Kantone und Gemeinden, weiterzugeben.

Die Resultate der neuen performance-orientierten Prüfmethode mit Biegebalkenrheometer und dynamischen Scherrheometer DSR ergaben vielversprechende Resultate. Es ist aber noch zu wenig Erfahrung vorhanden, um Resultate sicher interpretieren oder gar Anforderungswerte empfehlen zu können. Ein routinemässiger Einsatz dieser, aber auch weiterer performance-orientierten Methoden (Null-Scherviskosität, Äquiviskositätstemperatur, Bestimmung der Kraftduktilität) bei der Qualitätsüberwachung von neu erstellten Strassenbelägen wäre deshalb, und nicht zuletzt auch mit Blick auf die Entwicklungen in Europa, sinnvoll. Diese Daten könnten dann als Basis für eine aktive Mitarbeit in der europäischen Normierung dienen.

6 Dank

Das vorliegende Forschungsprojekt war nur möglich durch die Unterstützung von verschiedenen Personen und Ämtern aus Kanton und Gemeinden, für die hier herzlich gedankt sei. Insbesondere für die Unterstützung bei der Suche nach geeigneten Objekten und der Hilfe bei der Probenahme sind hier insbesondere folgenden Personen und Ämtern gedankt:

- Service des autoroutes du canton de Fribourg, Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions
- Baudepartement des Kantons Aargau, Abteilung Tiefbau, Unterabteilung Brücken und Tunnelbau
- Verkehrs- und Tiefbauamt des Kantons Luzern, Strasseninspektorat
- Amt für Tiefbau des Kantons Uri

Das Forschungsprojekt wurde finanziell unterstützt durch das Bundesamt für Strassen ASTRA.

7 Fachliche Auswertung



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

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 25.05.2010

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA SBT / VSS1999/131

Projekttitel: Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages? Performance-orientierte Methoden

Enddatum: 2010

Projektleiter

Name: Hugener Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abt. Strassenbau / Abdichtungen

Strasse, Nr.: Überlandstr. 129

PLZ: 8600 Email: martin.hugener@empa.ch

Ort: Dübendorf Telefon: +41 44 823 4487

Kanton, Land: Zürich Fax: +41 44 821 6244

Texte:

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Schadhaftes oder qualitativ minderwertiges Bindemittel kann die Ursache für verschiedene Arten von Belagsschäden wie thermische Risse, Ermüdungsrisse, fehlender Schichtenverbund, Kornausbrüche und Spurrinnen sein. Das vorliegende Forschungsprojekt hatte zum Ziel, einen Zusammenhang zwischen solchen Schadensbildern und den Bindemittleigenschaften zu suchen. Hierzu wurden Bohrkern aus geschädigten Strassenbelägen entnommen, von denen man annahm, dass diese Schäden durch das Bindemittel verursacht wurden. Am rückgewonnenen Bindemittel wurden neben Erweichungspunkt Ring und Kugel und Brechpunkt nach Fraass auch neue performance-orientierte Eigenschaften mit dem Biegebalken-Rheometer (BBR) und dem dynamischen Scherrheometer (DSR) erfasst, die eine verbesserte Differenzierung der Resultate versprochen. Zusätzlich wurden diese Bindemittel auch mit der Gelpermeations-Chromatographie (GPC) geprüft. Zum Vergleich wurde rückgewonnenes Bindemittel von nicht geschädigten Stellen oder Strassenbelägen, die bezüglich Belagstyp, Bindemittelsorte und Verkehrsbelastung möglichst gleich waren, analog untersucht. Allerdings konnten nur sechs Objekte mit den verlangten Anforderungen untersucht werden, da sich die Suche nach solchen Objekten als sehr schwierig erwiesen hat. Einerseits standen noch keine brauchbaren Daten aus der Datenbank STRADA zur Verfügung und andererseits konnten die Kantone nur bedingt geeignete Objekte finden. Die Daten der untersuchten Strecken bildeten somit eine zu kleine Basis um einen Zusammenhang zwischen Schadensbildern und Bindemittleigenschaften herzustellen. Es zeigte sich aber, dass die neuen



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

	<p>Prüfmethoden BBR und DSR in der Regel eine bessere Differenzierung ergaben als mit den bisher verwendeten Prüfmethoden wie Erweichungspunkt Ring und Kugel und Brechpunkt nach Fraass. Die Gelpermeations-Chromatographie (GPC) hat sich als wertvolle Untersuchungsmethode für PmB erwiesen, indem sie klar anzeigen kann, wenn die Bindemittelsorten nicht identisch sind. Eine weitere Anwendung und Validierung dieser Methode erscheint deshalb sinnvoll.</p>
Zielerreichung:	<p>Es ist nicht gelungen, das gesteckte Hauptziel zu erreichen und Zusammenhänge zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages zu finden. Der Grund dazu lag hauptsächlich darin, dass nicht genügend Objekte mit durch Bindemittel verursachte Schäden gefunden werden konnten. Es konnte aber gezeigt werden, dass die neuen performance-orientierten Prüfmethoden in einigen Fällen eine bessere Differenzierung der Resultate zulassen.</p>
Folgerungen und Empfehlungen:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Belagsschäden, die sich nur auf das Bindemittel zurückführen lassen, sind gemäss dieser Untersuchung eher selten. ▪ Die Qualitätssicherung und Dokumentation vor allem von älteren Strassenbelägen war bei Kantonen und Gemeinden manchmal mangelhaft oder nicht (mehr) vorhanden. ▪ In diesem Forschungsprojekt wurde wieder einmal festgestellt, dass das Auffinden von geeigneten Objekten äusserst schwierig sein kann. Bei objektgebundener Forschung sollten deshalb die benötigten Objekte schon vor oder spätestens bei der Eingabe des Forschungsprojektes vorhanden sein. Zumindest eine Zusicherung seitens der Bauherren, dass Objekte zur Verfügung gestellt werden, müsste vorhanden sein. Ein direkter Einbezug von Personen der entsprechenden Ämter ins Projekt wäre sehr wünschenswert.
Publikationen:	keine



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:

Die Auftragserteilung für dieses Projekt erfolgte am 13. Dezember 1999. Als begleitende Kommission wurde vom damaligen ASTRA Direktor die FK4 eingesetzt. Die FK4 hat für Ihre Schlussbeurteilung Rücksprache mit der nach heutiger Praxis an sich zuständigen EK 4.04 gehalten. (Da der Präsident der FK4 auch Mitglied der Forschungsstelle ist, wird zur Vermeidung eines Interessenskonfliktes die Rolle des Präsidenten der Begleitkommission durch ein Mitglied der FK4 wahrgenommen).

Dauer des Projektes
Zunächst ist festzustellen, dass dieses Projekt übermässig lange gedauert hat:

- o Zum einen ist dies darauf zurückzuführen, dass entgegen der ursprünglichen Erwartung nur bedingt geeignete Objekte gefunden werden konnten und sich die Aufgabenstellung als weniger eindeutig herausstellte, als dies bei Auftragserteilung angenommen wurde. Tatsächlich ist das Ziel dieses Projektes, eine Korrelation zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern zu finden, an sich schwierig zu erfüllen, weil das Auftreten von Belagsschäden von vielen Parametern abhängt, namentlich von Rohstoffen (also nicht nur vom Bindemittel), Mischgutzusammensetzung, -aufbereitung, -einbau sowie von Einflüssen wie Verkehrsbelastung und Klima. Dass das Auffinden geeigneter Objekte offenbar nicht einfach war und der Forschungsstelle Mühe bereitete zeigt, dass in der Praxis Schäden richtigerweise meist auf mehrere Faktoren zurückgeführt werden.
- o Zum anderen ist die lange Dauer des Projektes aber auch darauf zurückzuführen, dass die Rolle der begleitenden Kommission noch nicht in dem aktiv unterstützenden und korrigierenden Sinne wahrgenommen wurde, wie dies nach heutigem System der Projektabwicklung im Rahmen der Forschung im Strassenwesen sichergestellt ist. Hier ist seitens der Kommission durchaus Selbstkritik angebracht, wobei nicht übersehen werden sollte, dass durch die Hektik der europäischen Normierung die Milizarbeit der Kommission jahrelang stark gefordert war.

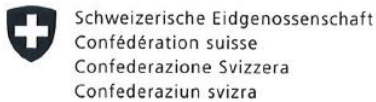
Wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Feststellungen
Der Bericht stellt nach eingehender Untersuchung in wissenschaftlich korrekter Weise fest, dass trotz erheblicher Bemühungen in den untersuchten Fällen kein nachweisbarer Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern gefunden werden konnte. Dieses, an sich negative Ergebnis, ist insofern wertvoll, als es nachgewiesener Massen jenen Kreisen den Wind aus den Segeln nimmt, die immer wieder behaupten, dass das Bindemittel an allem schuld sei. Solche Auffassungen hörte und hört man in der Praxis denn auch immer wieder. Sie standen insbesondere auch im Zeitpunkt des Antrags als Motivation für diese Forschungsarbeit im Raum. Folgerichtig startete die Forschungsarbeit zunächst mit einer Umfrage in der Praxis, um herauszufinden, wo denn in der Schweiz Strecken vorhanden wären, deren Schadensbilder sich mutmasslich auf Bindemittel zurückzuführen liessen. Entsprechend wurden schliesslich Strecken untersucht, die von der Praxis hinsichtlich Bindemittel möglicherweise als kritisch eingeschätzt und als solche gemeldet wurden. Dass die Untersuchung hier das Risiko von Fehleinschätzungen aufzeigen konnte, ist ein Erfolg und zeigt die Gefahr der man unterliegen könnte, wenn die Beurteilung subjektiv und nur aufgrund der Erfahrung oder mangelnder Basisdaten vorgenommen wird. In diesem Sinne mahnt die Untersuchung zur Vorsicht. Solche Mahnungen sind wertvoll insbesondere, wenn sie wissenschaftlich gut dokumentiert sind.

Wertvoll ist auch die Feststellung der Forschungsarbeit, dass Qualitätssicherung und Dokumentation vor allem von älteren Strassenbelägen bei Kantonen und Gemeinden manchmal mangelhaft oder nicht (mehr) vorhanden ist. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit einer gut dokumentierten modernen Erfassung der Einbaudaten und des Zustandes.

Der erstmalige Einsatz von performance-orientierten Methoden unterstützt den Trend in der Europäischen Normierung und trägt zur praktischen Absicherung des eigenen schweizerischen Erfahrungshintergrunds bezüglich dieser neuen Bindemittelprüfungen bei.

Umsetzung:

Verschiedene der in dieser Arbeit erarbeiteten Erkenntnisse konnten bereits in die laufende Normierungsarbeit einfließen. Dies gilt insbesondere für die Erkenntnisse mit den performance-orientierten Prüfmethode, welche die Ergebnisse anderer Forschungsprojekte anhand konkreter In-Situ Fälle er-



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

	<p>gänzte.</p> <p>Aus dem geht Bericht hervor, dass Belagsschäden in der Schweiz noch nicht genügend systematisch erfasst werden. Der Vorschlag der Forschungsstelle, das Sammeln dieser Daten in einer geeigneten zentralen Datenbank (z.B. STRADA) voranzutreiben und nachher diese Daten (z.B. in Forschungsarbeiten) gezielt zu nützen, um Schadensursachen zu finden, wird unterstützt.</p> <p>Das Projekt dokumentiert die Notwendigkeit einer engen Unterstützung der Forschungsstelle durch eine Begleitkommission und die klare Definition von Meilensteinen. Der Begleitkommission kommt eine aktiv unterstützende und entscheidende Rolle zu, wenn sich unerwartete Probleme ergeben, die den Erfolg beeinträchtigen (z.B. Fehlen genügender Beobachtungsstrecken) und diese sogar den Abbruch eines Projektes erfordern könnten. Diese Punkte sind in dem heutigen stark verbesserten System der Projektabwicklung im Rahmen der Forschung im Strassenwesen bereits erkannt und umgesetzt worden.</p>
weitergehender Forschungsbedarf:	<p>Im Sinne der einseitig auf Bindemittel ausgerichteten Fragestellung wird kein weiterer Forschungsbedarf gesehen. Allerdings besteht Forschungsbedarf hinsichtlich Zusammenwirken der verschiedenen erwähnten Parameter wie Rohstoffeigenschaften, Zusammensetzung, Aufbereitung und Einbau.</p> <p>Es ist noch zu wenig Erfahrung vorhanden, um die Resultate der neuen performance-orientierten Prüfmethode mit Biegebalkenrheometer, Bending Beam Rheometer (BBR), dynamischen Scherrheometer, Dynamic Shear Rheometer (DSR) sicher interpretieren oder gar Anforderungswerte empfehlen zu können. Ein weiteres zielgerichtetes Sammeln von Erfahrung mit diesen, aber auch weiteren performance-orientierten Methoden (Null-Scherviskosität, Äquiviskositätstemperatur, Bestimmung der Kraftduktilität) wäre deshalb, und nicht zuletzt auch mit Blick auf die Entwicklungen in Europa, sinnvoll. Diese Daten könnten dann als Basis für eine aktive Mitarbeit in der europäischen Normierung dienen.</p>
Einfluss auf Normenwerk:	Ist im erwähnten Masse bereits erfolgt.

Präsident Begleitkommission:

Name:	Seeberger	Vorname:	Max
Amt, Firma, Institut:	Tecnotest AG		
Strasse, Nr.:	Alemannenweg 4		
PLZ:	8803	Email:	m.seeberger@tecnotest.ch
Ort:	Rüschlikon	Telefon:	044 724 36 00
Kanton, Land:	ZH, Schweiz	Fax:	044 724 36 01

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

M. Seeberger + für FK 4: Boho P...

8 Literaturverzeichnis

1. TR 15352 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Entwicklung von auf das Gebrauchsverhalten bezogenen Spezifikationen: Statusbericht 2005, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2006.
2. EN 1426 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2007.
3. EN 14771 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Biegekiechsteifigkeit - Biegebalkenrheometer (BBR), CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2005.
4. CEN/TS 15325 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Null-Scherviskosität (ZSV) mit Hilfe eines Schubspannungs-Rheometers im Kriechmodus, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2008.
5. CEN/TS 15324 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Äquiviskositätstemperatur basierend auf niedriger Scherviskosität mit Hilfe eines dynamischen Scher-Rheometers in niederfrequentem Schwingungsmodus, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2008.
6. EN 14770 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR), CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2005.
7. Wörner, T., M. Stütz, and B. Wallner, *Weiterentwicklung der Prüfung des Kälteverhaltens von Strassenbaubitumen und PmB mit dem Bending Beam Rheometer (BBR)*, Ed. Bundesministerium für Verkehr, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, 2009, p. 54.
8. EN 14769 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV), CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2005.
9. EN 15323 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Beschleunigte Langzeitalterung mit dem Verfahren mit rotierendem Zylinder (RCAT), CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2007.
10. FEHRL, *BitVal - Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests - Report on Phase 1 of the BiTVal Project*, Editor C. Nicholls, 2009.
11. Harvey, J. and B. Tsai, *Long Term Oven Aging Effects on Fatigue and Initial Stiffness of Asphalt Concrete*. Transportation Research Record, 1590, 1997, p. 89 -98.
12. McHale, M.J., *Stiffness Testing on HRA Wearing Courses*. Highways and Transportation, 43(12), 1996.
13. Sanders, C.A. and E.L. Dukatz, *Evaluation of Percent Fracture of Hot Mix Asphalt Gravels in Indiana*, Editor American Society for Testing and Materials, 1992.
14. Damm, K.W., *Langzeitverhalten von Asphaltdeck- und Binderschichten hochbelasteter Verkehrsflächen in Hamburg*. Strasse und Autobahn, 49(7), 1998, p. 355-364.
15. *N9 Planches de comparaison avec bitume modifles aux polymeres*, Editor Office fédéral des routes, Service des routes nationales du Canton du Valais, Sous Commission VSS 271/15, 1991.
16. Partl, M.N., *Langzeitverhalten bituminöser Autobahnbeläge*. Strasse und Verkehr, (Nr. 8), 1993, p. 436 - 443.
17. EN 1427 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Erweichungspunktes - Ring und Kugel-Verfahren, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2007.
18. EN 12596 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der dynamischen Viskosität mit Vakuum - Kapillaren, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2007.

19. EMPA-Methode SOP 3025 Polymeranalyse mittels GPC, 1998.
20. EN 12593 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2007.
21. EN 13589 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Streckeeigenschaften von modifizierten Bitumen mit dem Kraft- Duktilitäts-Verfahren, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2003.
22. SN 670460 Bituminöses Mischgut Prüfvorschriften – Haftvermögen von bituminösen Bindemitteln an Mineralstoffen, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS 1996.
23. *Workshop Briefing, 2nd European Road Research Conference*, Brüssel 1999.
24. Bellin, P., *Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program SHRP - Teil 1: Bindemittel-Spezifikationen*. Bitumen, 2, 1995, p. 50.
25. AASHTO TP1 Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR), American Association of State Highway and Transportation Officials
26. Sybilski, D. *Zero-Shear Viscosity: Phenomenons at measurement, interpretation and relation to permanent deformation*. Eurasphalt and Eurobitume Congress 1996,
27. Desmazes, C., et al. *A protocol for reliable measurement of zero-shear-viscosity in order to evaluate the anti-rutting performance of binders*. Eurasphalt and Eurobitume Congress 2000, p. 203.
28. Raab, C., M.N. Partl, and M. Hugener, *Untersuchung thermischer Schäden eines polymermodifizierten Strassenbelags*. Strasse und Verkehr, 12, 1994, p. 618.
29. Hugener, M., *Funktionsstabilität von Polymerbitumen*. Strasse und Verkehr, (4), 1995, p. 160-166.
30. SN 640925b Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) - Anleitung zur visuellen Zustandserhebung und Indexbewertung mit dem Schadenkatalog, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
31. SN 671965 Bituminöses Mischgut - Dichte (zurückgezogene Norm), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
32. SN 671967 Bituminöses Mischgut - Rohdichte, Berechnen des Hohlraumgehaltes (zurückgezogene Norm), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
33. SN 671955 Bituminöses Mischgut - Bestimmen des löslichen Bindemittelanteils (zurückgezogene Norm), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
34. SN 670810 Mineralische Baustoffe und Lockergesteine - Siebanalyse (zurückgezogene Norm), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
35. SN 671860 Bituminöse Bindemittel, Prüfvorschriften - Rückgewinnung aus Extraktionslösungen (zurückgezogene Norm), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
36. AASHTO TP5 Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials
37. Editor Service des autoroutes du canton de Fribourg - Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions, Internes Dokument.
38. Hesp, S.A.M. and S. Subramani. *Another look at the bending beam rheometer for specification grading of asphalt cements* MariePav6, Torino, Italy 2009, p. 10.
39. Hesp, S.A.M., et al. *Rheological testing of asphalt cements recovered from an Ontario pavement trial* MariePav6, Torino, Italy 2009, p. 10.

40. *Superpave - Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*. Superpave Series No.1 (SP-1) 2003, Asphalt Institute, Lexington (US) p 61.