

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. N/1, Ruhr-Universität Lehrstuhl für Verkehrswegebau

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16639 N / 1**

***Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von
Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen***

(Bewilligungszeitraum: 01.01.2012 - 30.06.2014)

der AiF-Forschungsvereinigung

Deutsches Asphaltinstitut e.v. - DAI

Bochum, 17.9.2014

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung	3
1	Einleitung und Problemstellung	5
2	Zielsetzung	6
3	Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse	7
3.1	Bitumen	7
3.1.1	Allgemeines.....	7
3.1.2	Physikalische Eigenschaften	9
3.1.3	Chemische Zusammensetzung	13
3.2	Gestein	17
3.3	Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen	19
4	Untersuchungsmethodik.....	22
4.1	Auswahl der Materialien	22
4.1.1	Bitumen	22
4.1.2	Gesteine	24
4.2	Bitumenuntersuchungen.....	24
4.2.1	Prüfverfahren zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften	24
4.2.2	Prüfverfahren zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung	25
4.3	Gesteinsuntersuchungen.....	26
4.4	Versuche zum Haftverhalten	26
4.4.1	Rolling-Bottle-Test.....	26
4.4.2	Schüttelabriebversuch.....	27
4.4.3	Bestimmung der Wasserempfindlichkeit	27
4.4.4	Kontaktwinkelmessungen.....	28
4.5	Einfluss der Polymermodifizierung von Bitumen auf das Haftverhalten	29
5	Versuchsergebnisse	30
5.1	Bitumen	30
5.2	Gesteinskörnungen	36
5.3	Versuche zum Haftverhalten	38
5.3.1	Ausgewählte Materialien	38

5.3.2	Rolling-Bottle-Test.....	39
5.3.3	Schüttelabriebversuch.....	41
5.3.3	Bestimmung der Wasserempfindlichkeit	43
5.3.4	Kontaktwinkelmessungen.....	46
6	Bewertung der Versuchsergebnisse	48
6.1	Bitumen	48
6.1.1	Zusammenhänge zwischen den physikalischen Kennwerten ..	48
6.1.2	Einfluss der verwendeten Polymere auf die Eigenschaften der untersuchten Bitumen.....	53
6.1.3	Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Straßenbaubitumen.....	57
6.1.4	Unterschiede in den Bitumeneigenschaften in Abhängigkeit von der liefernden Raffinerie	64
6.1.5	Alterungsverhalten der untersuchten Straßenbaubitumen	71
6.2	Haftverhalten	73
6.1.1	Rolling-Bottle-Test.....	73
6.1.2	Schüttelabriebversuch.....	80
6.1.3	Bestimmung der Wasserempfindlichkeit	84
6.1.4	Kontaktwinkelmessungen.....	86
6.1.5	Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren	88
6.1.6	Einfluss der Polymermodifizierung	89
7	Zusammenfassung und Ausblick	91
8	Literatur	93
	Abbildungsverzeichnis	97
	Tabellenverzeichnis	102

0 Kurzfassung

Die Dauerhaftigkeit unserer Straßen hängt maßgeblich von dem Haftverhalten des Bitumens und der Gesteinskörnung ab, denn eine Vielzahl an Rissen – sowohl Kälte- als auch Ermüdungsrisse – entsteht in der Grenzfläche der beiden Komponenten durch ein Versagen der Adhäsion. Zum Einfluss der Gesteine bestehen zwar Kenntnisse bezüglich der mineralogischen Zusammensetzung und deren qualitativen Einfluss auf das Adhäsionsverhalten, jedoch gibt es immer noch unzureichend erforschte quantifizierbare Einflussfaktoren. Der Einfluss der Bitumen auf die Adhäsion wird bislang überwiegend auf Basis verfahrenstechnisch einfacher Untersuchungen unter Einbeziehung der Gesteinskörnungen durchgeführt. Direkte Vorgaben an die Zusammensetzung der Bitumen, die gegebenenfalls in Kombination mit der jeweils verwendeten Gesteinsart ein adhäsionsbegünstigendes Bitumen kennzeichnen, sind aufgrund der chemischen Vielfalt der Bitumen bislang nicht klar formuliert worden.

In diesem Forschungsprojekt soll durch eine umfassende Analyse von 90 im Straßenbau regelmäßig eingesetzten Bitumen aus acht, über Deutschland verteilten, Raffinerien der Einfluss der physikalischen Eigenschaften bzw. der chemischen Zusammensetzung auf das Adhäsionsverhalten bei verschiedenen Gesteinsarten mit Hilfe ausgewählter Bitumen quantifiziert werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht. Ein Einfluss der physikalischen und chemischen Grundeigenschaften der Bitumen auf die Adhäsion konnte grundsätzlich, wenn auch nicht systematisch nachgewiesen werden. Darüber hinaus konnten auch die Laborversuche tiefergehend bewertet werden. Der Schüttelabriebversuch hat sich bei den hier verwendeten Randbedingungen als ungeeignet für ein Adhäsionsprüfverfahren erwiesen, da sich die Viskosität als maßgeblicher Faktor für den Abrieb herausgestellt hat. Bei den anderen Prüfverfahren ist ein unterschiedliches Haftverhalten der Bitumen und Gesteine festzustellen, jedoch zeigen die Versuche kein einheitliches Ranking der verschiedenen Bitumen-Gestein-Kombinationen, da die Versuche zu unterschiedliche Prüfungsrandbedingungen aufweisen. Hier wären Angleichungen der Prüfungsrandbedingungen zielführend. Darüber hinaus können zusätzliche Kennwerte wie die Säurezahl des Bitumens, der Anteil von Metallen wie Nickel und Vanadium im Bitumen oder das Zeta-Potential der Gesteine weitere grundlagenwissenschaftliche Erkenntnisse zum tieferen Verständnis der Zusammenhänge liefern. Die große in diesem Projekt gewonnene Datenmenge sollte um weitere Bitumen- und Gesteinskennwerte erweitert werden, so dass mit Hilfe einer Multivarianzanalyse die Einflussfaktoren in Zukunft eindeutig quantifiziert werden können.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes konnten zudem wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften der im Straßenbau verwendeten Bitumen gewonnen werden. Die physikalischen Kennwerte (v. a. die Erweichungspunkte Ring und Kugel) der verschiedenen Bitumensorten gleicher Raffinerie unterliegen größtenteils nur geringen Schwankungen, während das rheologische Verhalten (Black-Diagramm) in einigen Fällen grundsätzliche Unterschiede aufweist. Darüber hinaus zeigten die mit verschiedenen Messgeräten bestimmten physikalischen Kennwerte bei den

Straßenbaubitumen eine weitgehende Übereinstimmung. So können die Ergebnisse des Dynamischen Scherrheometers grundsätzlich die herkömmlichen Bitumenkennwerte in allen relevanten Temperaturbereichen ersetzen.

Eine thermisch-oxidative Alterung (RTFOT-Alterung), die an den Straßenbaubitumen durchgeführt wurde, bewirkt neben einer Steifigkeitserhöhung eine charakteristische Veränderung der Bitumenrheologie. Im Black-Diagramm ist eine deutliche Reduzierung der steifigkeitsabhängigen Phasenwinkel festzustellen.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften ist durch den Anteil der Asphaltene gegeben: mit zunehmendem Asphaltengehalt steigt die Bitumensteifigkeit stetig an. Der Einfluss des Asphaltengehalts auf die Viskosität nimmt bei steigender Temperatur und der damit verbundenen sinkenden Bitumensteifigkeit zu. Die Aufteilung der Aliphaten, Mono-, Di- und Polyaromaten sowie der polaren Verbindungen innerhalb der Maltenephase beeinflusst die physikalischen Bitumeneigenschaften dagegen ebenso wie die Aufteilung der Asphaltene in ihre leicht-, mittel- und schwerlöslichen Anteile und das Siedeverhalten nicht maßgebend.

1 Einleitung und Problemstellung

Zur Dimensionierung von Straßenbefestigungen aus Asphalt werden beispielsweise in den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht [RDO Asphalt, 2009] zwei entscheidende Schadensmerkmale berücksichtigt: die Rissbildung durch Ermüdung und die theoretische Gefahr der Spurbildung. Anforderungen, durch deren Einhaltung die Spurbildung minimiert werden soll, werden sowohl an die Bindemittel (z.B. Erweichungspunkt Ring und Kugel), die Gesteinskörnungen (z.B. Fließkoeffizient) als auch an die Asphaltzusammensetzung (indirekt beispielsweise durch den Hohlraumgehalt) gestellt. Zur Vermeidung von Rissbildungen bestehen ebenfalls Anforderungen an die einzelnen Komponenten, sodass Risse durch die Gesteinskörner oder durch das Bitumen minimiert werden. Eine Vielzahl an Rissen – sowohl Kälte- als auch Ermüdungsrisse – entsteht jedoch in der Grenzfläche der beiden Komponenten durch ein Versagen der Adhäsion.

Auf Seiten der Gesteine bestehen zwar Kenntnisse bezüglich der chemischen Zusammensetzung und deren Einfluss auf das Adhäsionsverhalten, jedoch gibt es immer noch unzureichend erforschte Einflussfaktoren. Der Einfluss der Bitumen auf die Adhäsion wird bislang überwiegend auf Basis verfahrenstechnisch einfacher Untersuchungen unter Einbeziehung der Gesteinskörnungen durchgeführt. Direkte Vorgaben an die Zusammensetzung der Bitumen, die gegebenenfalls in Kombination mit der jeweils verwendeten Gesteinsart ein adhäsionsbegünstigendes Bitumen kennzeichnen, sind aufgrund der chemischen Vielfalt der Bitumen bislang nicht klar formuliert worden.

National wie international werden zahlreiche Verfahren zur Analyse des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen beschrieben. Ein Beispiel ist der nach europäischem Regelwerk aktuell anzuwendende Rolling-Bottle-Versuch. Sämtliche Ansätze weisen jedoch bedeutende Schwachstellen auf. Darunter fällt beispielsweise eine mangelhafte Präzision, ein starker Einfluss des Prüfers oder gar die Tatsache, dass nicht die Adhäsion, sondern letztendlich andere Parameter mit dem Verfahren geprüft werden.

2 Zielsetzung

In diesem Forschungsprojekt soll durch eine umfassende Analyse von Straßenbaubitumen der Einfluss ihrer physikalischen Eigenschaften bzw. ihrer chemischen Zusammensetzung auf das Adhäsionsverhalten bei verschiedenen Gesteinskörnungen quantifiziert werden.

Eine detaillierte chemische und physikalische Untersuchung von 90 im Straßenbau regelmäßig eingesetzten Bitumen aus acht, über Deutschland verteilten, Raffinerien ermöglicht trotz der provenienz- und herstellungsbedingten Vielfalt eine Charakterisierung der Bitumen. Ziel dieses ersten Schrittes ist zunächst eine Analyse der Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften der in Deutschland verwendeten Straßenbaubitumen. Acht in Deutschland im Straßenbau regelmäßig eingesetzte Gesteinsarten – teilweise bereits mit bekannt positiven oder negativen Einflüssen auf das Adhäsionsverhalten – werden in einem zweiten Schritt mineralogisch und petrographisch untersucht.

In dem abschließenden dritten Schritt werden ausgewählte Bitumen und Gesteine mit mehreren Adhäsionsprüfungen untersucht. Diese Ergebnisse erlauben einen Vergleich der Prüfverfahren selbst und aufgrund der Analyse mit mehreren Verfahren eine Bewertung des Adhäsionsverhaltens der Kontaktpartner Bitumen und Gestein. Auf diesen Ergebnissen aufbauend sollen Rückschlüsse auf die zur Adhäsion relevanten Eigenschaften bzw. Bestandteile der Kontaktpartner, speziell des Bitumens, gezogen werden.

3 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse

3.1 Bitumen

3.1.1 Allgemeines

Den Ursprung von Rohöl bilden vor Jahrmillionen abgestorbene, meist kleinste Lebewesen, die sich auf dem Meeresboden ablagerten. Bei eingeschränkten oder ganz verhinderten Fäulungsprozessen folgte unter hohem Druck und hoher Temperatur über einen langen Zeitraum die Umwandlung zum Erdöl. Die Vielzahl der Parameter, die die Entstehung des Erdöls beeinflussen, bewirkt die Entwicklung unterschiedlichster Rohöle, sodass die Anzahl an Rohölen, die weltweit produziert werden, beispielsweise von [ZOOB, AIREY, 2005] auf annähernd 1.500 beziffert wird. Diese unterscheiden sich elementar in ihren Eigenschaften und ihrer Zusammensetzung, sodass nur etwa ein Zehntel des verfügbaren Erdöls für die Produktion von Bitumen geeignet ist. Generell gilt hierbei: je schwerer das Öl, desto mehr Bitumen wird daraus gewonnen [WHITEOAK, READ, 2003].

Die meisten der tendenziell schwereren Öle, die zur Bitumenherstellung verwendet werden, weisen nach der Förderung eine für Bitumen zu geringe Viskosität auf. Erst durch die Verarbeitung treten die für die Viskosität verantwortlichen Bestandteile, die Asphaltene und Harze, in ausreichender Menge auf. Dies geschieht durch die Konzentration und teilweise auch durch die Neubildung der Asphaltene und Harze [NEUMANN, 1995]. Im zweiten Fall werden durch das sogenannte Anblasen Oxidationsprozesse ausgelöst, die zu einer Umwandlung der leichteren, vorwiegend aromatischen Verbindungen zu Harzen und/oder Asphaltinen führt. Bei der fraktionellen Destillation findet eine Konzentration der Harze und Asphaltene statt. Hierbei werden im ersten Schritt unter atmosphärischem Druck und im zweiten Schritt unter reduziertem Druck bei Temperaturen von 350 bis 425 °C nach und nach die jeweils leichtest flüchtigen Bestandteile abgetrennt. Als Endprodukt dieses Prozesses verbleibt das Bitumen als schwerster Bestandteil des Rohöls.

Weltweit werden fast 100 Mio. t [LESUEUR, 2009] und alleine in Deutschland rund 2,5 Mio. t [ARBIT] Bitumen im Jahr verarbeitet. Einen Überblick über die Raffinerien und die Pipelines in Deutschland gibt Bild 3-1. Für Deutschland beträgt der Anteil des Bitumens, das im Straßenbau eingesetzt wird, fast 80 %, während weltweit 95 % auf den Straßenbau entfallen. Die im Straßenbau primär eingesetzten Destillationsbitumen, einschließlich der durch Zusätze modifizierten Arten, stellen folglich den größten Anteil dar. Die übrigen Arten wie Hart- oder Oxidationsbitumen werden im Gegensatz dazu nur relativ selten im Straßenbau eingesetzt. Bezüglich des Herstellungsprozesses können die im Straßenbau verwendeten Bitumen in drei Gruppen aufgeteilt werden: direkt auf die gewünschten Eigenschaften destillierte Bitumen, Mischungen aus verschiedenen Bitumen, die in Kombination die gewünschten Eigenschaften aufweisen und darüber hinaus unterschiedlich modifizierte Bitumen. Während die beiden erstgenannten Gruppen lediglich Unterschiede im Herstellungsprozess aufweisen sollten, weist die dritte Gruppe gezielt abweichende Charakteristika auf. Im Gegensatz zu

anderen Modifizierungsarten wie beispielsweise Gummi-, Wachs- oder chemische Modifizierungen sind Polymermodifizierungen aufgrund der umfangreichen Erfahrungen der vergangenen Jahre bereits in den [TL Bitumen-StB 07, 2013] aufgenommen. Eine wesentliche Verbesserung durch die Polymere ist die Vergrößerung der Plastizitätsspanne, also dem Temperaturbereich, in dem das Bitumen die Beanspruchungen im Gebrauchszustand theoretisch schadenfrei aufnehmen kann (technische Definition siehe Kapitel 3.1.3). Bezüglich der Polymermodifizierungen wird zwischen Elastomeren und Plastomeren unterschieden. Die Plastomere erhöhen im Wesentlichen die Plastizitätsspanne, während die Elastomere zusätzlich das elastisch rückverformende Potential der Bitumen verbessern. Für beide Modifizierungsarten gilt, dass die Zusätze mit dem Bitumen verträglich sein müssen (siehe Kapitel 3.1.3).

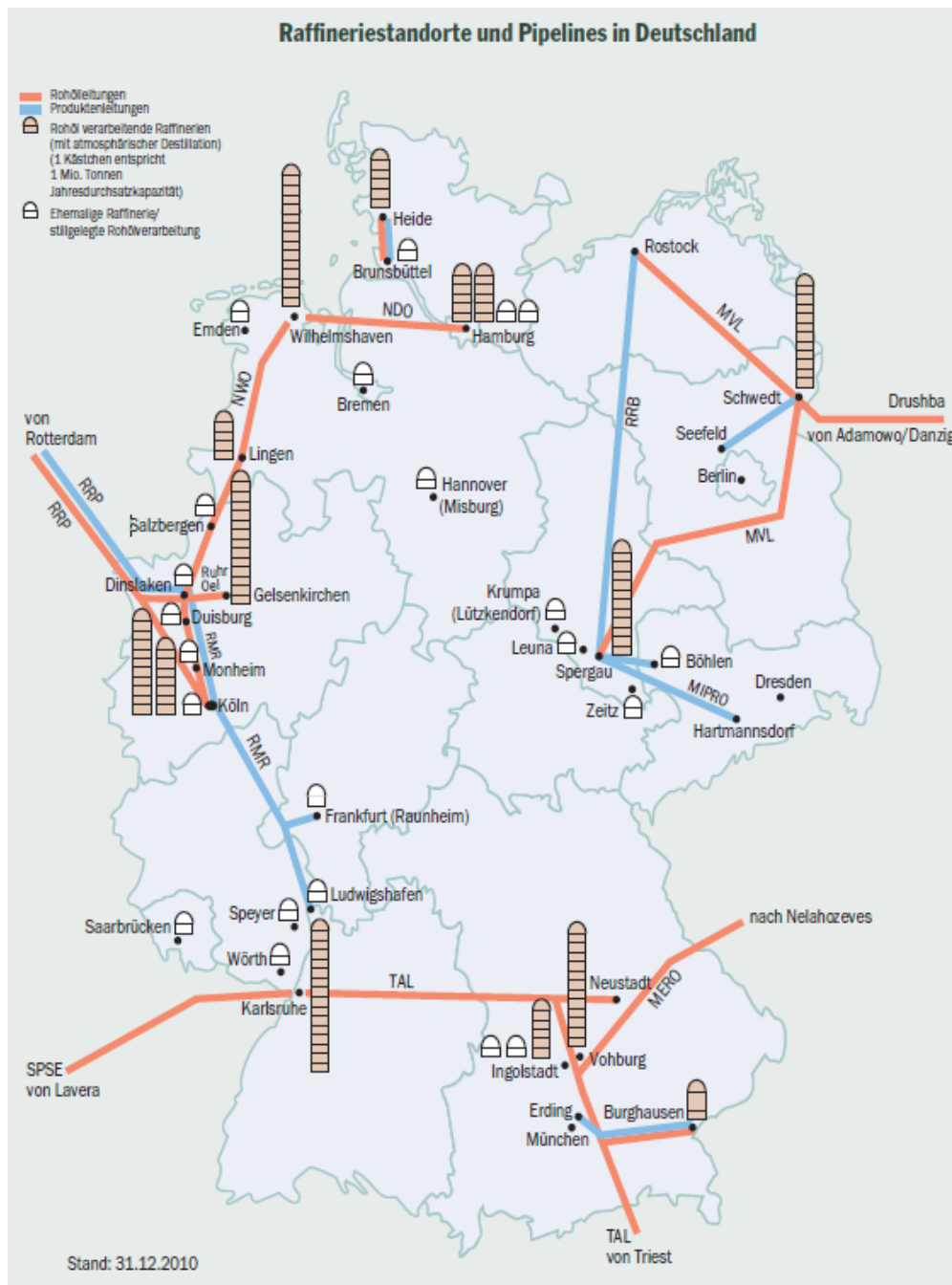


Bild 3-1: Raffineriestandorte und Pipelines in Deutschland [Mineralölwirtschaftsverband]

3.1.2 Physikalische Eigenschaften

Bitumen weist ein in hohem Maße temperaturabhängiges Verhalten auf. Dies betrifft die Adhäsion (siehe Kapitel 3.3) und vor allem die Kohäsion. Nicht modifizierte Straßenbaubitumen sind bei niedrigen Temperaturen hart und elastisch bis spröde. Bei einer Erwärmung werden Bitumen kontinuierlich duktiler und die Elastizität wie auch die Viskosität nimmt ab. Ohne einen diskreten Wechsel des Aggregatzustandes, also ohne einen definierten Schmelzpunkt, wird das Bitumen bei hohen Temperaturen dünnflüssig ohne elastische Anteile aufzuweisen. Die genannten Zustände treten je nach Härte des Bitumens bei unterschiedlichen Temperaturen auf. Dieses Verhalten kann in Anlehnung an [ZENKE, 1990] anhand des kolloidalen Aufbaus des Bitumens (siehe Kapitel 3.1.2) erfasst werden (Bild 3-2).

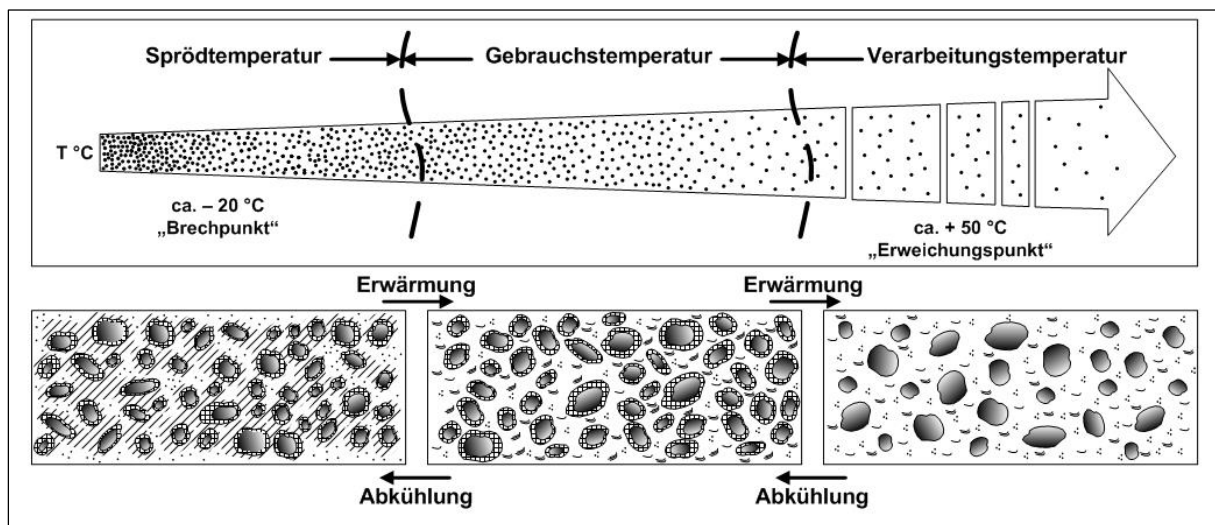


Bild 3-2: Veränderung des Kolloidsystems in Abhängigkeit von der Temperatur [aus CETINKAYA, 2011 in Anlehnung an ZENKE, 1990]

Bei niedrigen Temperaturen ist die Struktur der Asphaltene derart dicht, dass Deformationen des Bitumens nur durch das Aufbringen großer Kräfte möglich sind. Werden Deformationen im Bitumen erzeugt, so geschieht dies fast ausschließlich durch Deformationen der Asphaltene, da Verschiebungen zwischen diesen kaum möglich sind. Die Energie, die in das System Bitumen gebracht wurde, kann innerhalb des Bitumens entweder durch sehr langsame Verschiebungsprozesse zwischen den Asphaltene oder durch die Rückverformung der Asphaltene abgebaut werden. Das Bitumen weist folglich einen hohen elastischen Verformungsanteil auf. Sind die internen Spannungen jedoch zu groß, entstehen Rissen zwischen den Asphaltene und damit auch im Bitumen.

Prüftechnisch werden die beschriebenen Deformations- bzw. Versagensmöglichkeiten durch die Bestimmung der Biegekiechsteifigkeit und des m -Wertes mittels Biegebalken-Rheometer (BBR) oder des Brechpunkts nach Fraaß erfasst. Die Biegekiechsteifigkeit, die nach [DIN EN 14771, 2012] als Verformungswiderstand eines Bitumenbalkens bei einer Dreipunktbiegebelastung (Bild 3-3, links) gemessen wird, gibt indirekt an, welche Kräfte bei einer extern induzierten Deformation entstehen. Bei geringerer Biegekiechsteifigkeit erlaubt die Struktur der Asphaltene größere interne Umlagerungen, wodurch geringere Spannungen aufgebaut werden. Eine

schnelle Rückverformung der Asphaltene und damit schnelle Abnahme der internen Spannungen wird durch einen hohen m-Wert gekennzeichnet. Der m-Wert wird im BBR-Versuch durch eine starke Abnahme der Biegekriechsteifigkeit mit der Versuchsdauer (beides im logarithmischen Maßstab) berechnet. Im Gegensatz zum BBR-Versuch wird durch die Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß entsprechend [DIN EN 12593, 2002] unmittelbar die Temperatur bestimmt, bei der ein dünner Bitumenfilm bei einer vorgegebenen Deformation reißt (Bild 3-3, rechts).

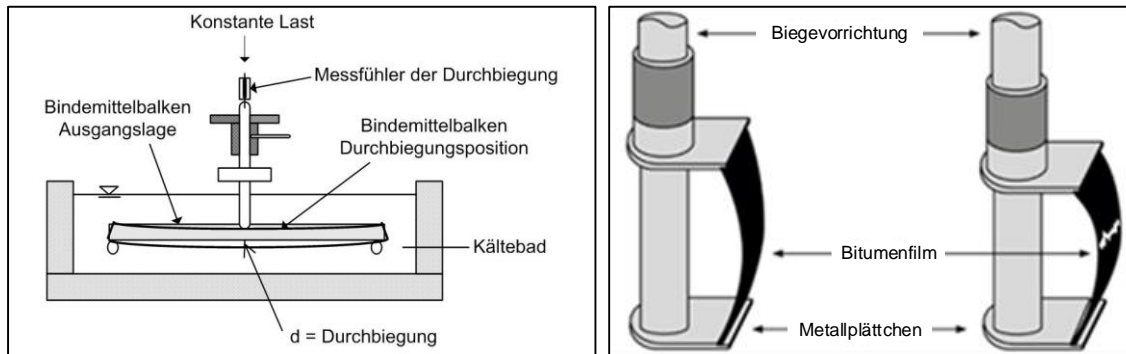


Bild 3-3: links: Prinzipskizze Bending Beam Rheometer [BP] rechts: Schematische Darstellung, Brechpunkt nach Fraaß [ARBIT]

Durch eine Erwärmung des Bitumens reduziert sich der Volumenanteil der Mizellen durch das Lösen von Asphaltene geringerer Assoziationskräfte, die dann als molekular aufgelöste Asphalteneanteile dispergieren. Daher wird die Härte des Bitumens in der Regel so gewählt, dass im üblichen Gebrauchstemperaturbereich Deformationen des Bitumens unter großem Kraftaufwand möglich sind. Diese können sowohl durch ein Verschieben zwischen den Asphaltene als auch Deformationen der Asphaltene selbst auftreten. Auf kurzzeitig aufgebrachte Deformationen (z.B. rollender Straßenverkehr) reagiert das Bitumen durch eine Rückverformung der Asphaltene somit weitestgehend elastisch, während bei andauernden Deformationen (z.B. temperaturbedingte Zwangsspannungen) die Spannungen durch die Umlagerung der Asphaltene abgebaut werden.

Eine konventionelle Bitumenuntersuchung im Gebrauchstemperaturbereich ist die Bestimmung der Nadelpenetration nach [DIN EN 1426, 2006]. Die Eindringtiefe der Nadel gibt dabei Auskunft über die Bitumensteifigkeit bei 25 °C und lässt somit Rückschlüsse zu, für welche Anwendungen das Bitumen geeignet ist.

In der Regel findet die Bestimmung der Kraftduktilität bei 5 bis 25 °C und damit ebenfalls im Gebrauchstemperaturbereich statt. Die Kraft, die zu Versuchsbeginn der Deformation entgegengebracht wird, ist entscheidend von der Bitumenhärte abhängig. Da bei diesem Versuch starke Dehnungen vorgenommen werden, nimmt die Kraft bei nicht modifizierten Straßenbaubitumen nach einem anfänglichen Maximum stark ab. Bei Polymermodifiziertem Bitumen, für das dieser Versuch vorgesehen ist, kann das Netzwerk aus Polymeren mit zunehmender Deformation einen ansteigenden Widerstand aufbauen. Erst bei Überschreitung des Maximums reißen die Polymerverbindungen, wodurch ein abruptes Reißen des Bitumens auftritt.

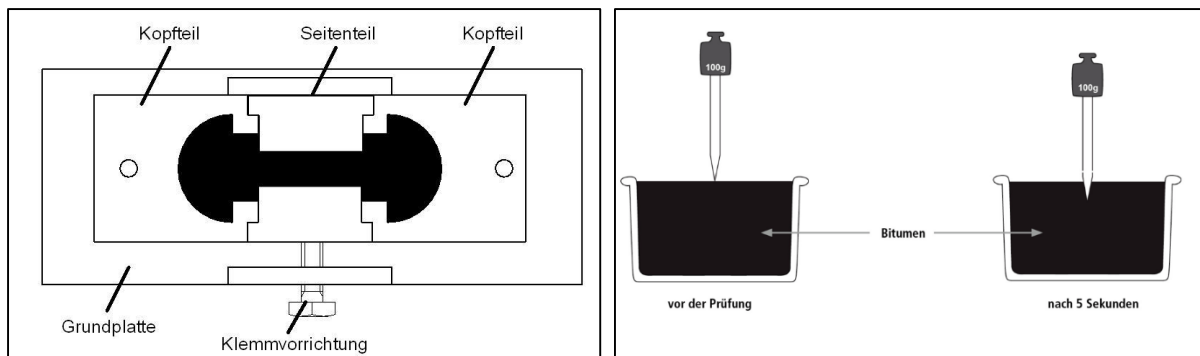


Bild 3-4: links: Duktilitätsform [MANKE; 2009 in Anlehnung an DIN EN 13589] rechts: Schematische Darstellung, Nadelpenetration [ARBIT]

Eine weitere Erwärmung des Bitumens führt oberhalb des Gebrauchstemperaturbereichs dazu, dass die Mizellen in der Maltene phase ausreichend Raum haben, um aneinander vorbei zu gleiten. In diesem Zustand weist das Bitumen nur noch ein geringes elastisches Rückstellvermögen auf und fließt zäh. Unter Verkehrsbelastung werden die Gesteinskörnungen nur noch mit einer zähen Masse verklebt, die der Spurbildung nur geringen Widerstand leistet.

Der Erweichungspunkt Ring und Kugel, der nach [DIN EN 1427, 2006] erreicht ist, sobald eine Stahlkugel unter definierten Bedingungen auf einem Bitumenfilm nicht mehr gehalten wird, begrenzt den Gebrauchstemperaturbereich nach oben. Durch die Vielzahl weiterer Einflussfaktoren auf die Grenzbereiche der Gebrauchstauglichkeit (z.B. Mischgutzusammensetzung, Verkehrsbelastung) kann dies aber nur eine sehr grobe Abschätzung darstellen.

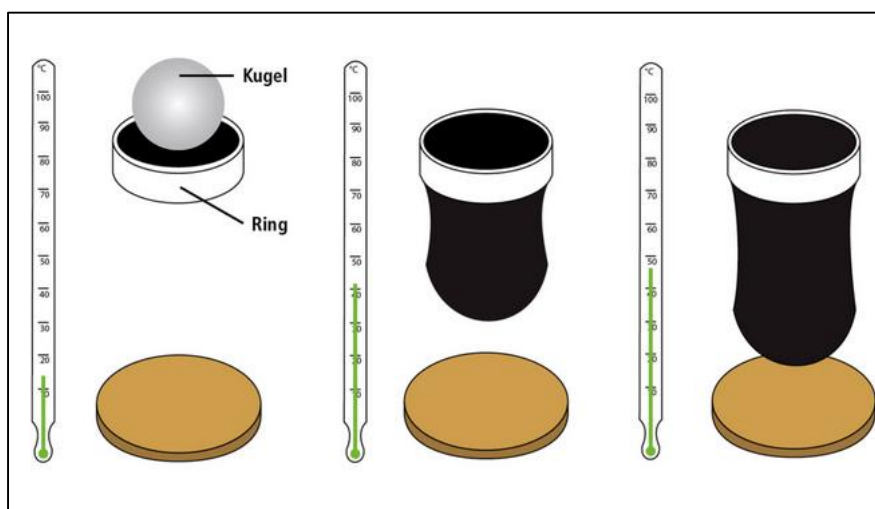


Bild 3-5: Schematische Darstellung, Erweichungspunkt Ring und Kugel [ARBIT]

Erhöht sich die Temperatur vom Gebrauchsbereich zum Bereich für Asphaltherstellung und -verarbeitung, können sich die Mizellen zunehmend ungestört und frei bewegen. Die Viskosität sinkt damit von relativ hochviskosem bis hin zu niedrigviskosem Verhalten. Deformationen sind in diesem Zustand viskoplastisch.

Die verschiedenen Formen der Viskositätsmessung charakterisieren das Bitumenverhalten im fließfähigen Zustand. Neben den klassischen Kapillarviskosimetern kommen hierzu vermehrt Rotationsviskosimeter zum Einsatz. So ist beispielsweise in

[DIN EN 13702-1, 2010] die Bestimmung der dynamischen Viskosität mittels Rotationsviskosimeter im Platte-Kegel-Verfahren (eigentlich nur für Polymermodifizierte Bitumen) genormt. Bei diesem Versuch wird die Bitumenprobe kraftschlüssig zwischen einer unteren, statischen Platte und einem oberhalb der Probe befindlichen Kegel gehalten. Der Kegel beansprucht das Bitumen durch seine Rotation auf Scherung. Der Neigungswinkel des Kegels ist derart ausgebildet, dass die Scherrate, also der Quotient aus Deformationsgeschwindigkeit und Plattenabstand, in der gesamten Probe konstant ist. Aus dem Verhältnis zwischen der aufgetragenen Scherspannung und der Scherrate wird die dynamische Viskosität berechnet.

Wie die beschriebene dynamische Viskosität kann auch die komplexe Viskosität in Anlehnung an [DIN EN 14770, 2012] mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR) bestimmt werden. Der entscheidende Unterschied zwischen dynamischer und komplexer Viskosität ist die Art der Beanspruchung. So wird die komplexe Viskosität als Widerstand des Bitumens gegen eine oszillierende Beanspruchung gemessen, während die dynamische Viskosität den Widerstand gegen eine gleichförmige, in diesem Fall rotierende Deformation darstellt. Obwohl es sich bei den beiden Viskositätsarten mechanisch um unterschiedliche Größen handelt, besagt die empirisch entwickelte COX-MERZ-Regel, dass beide Viskositäten für viele Substanzen gleich sind, sofern die Scherrate der rotatorischen der Kreisfrequenz der oszillatorischen Messung entspricht [COX, MERZ, 1957].

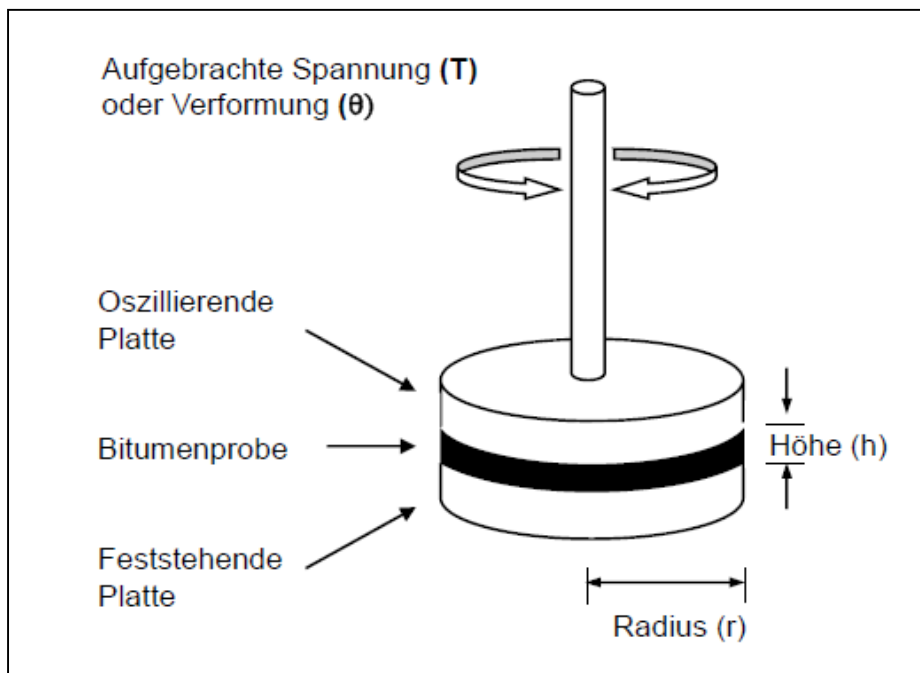


Bild 3-6: Prinzipskizze dynamisches Scherrheometer [ZIELKE, 2008]

Nach [TL Bitumen-StB 07, 2013] ist das DSR im Temperaturbereich zwischen 30 und 90 °C einzusetzen. Möglich ist darüber hinaus die Anwendung bei höheren wie bei niedrigeren Temperaturen. Als Ergebnis liefert das DSR bei Durchführung des in den [TL Bitumen-StB 07, 2013] geforderten Oszillationsversuchs nach [DIN EN 14770, 2012] zwei Kennwerte: den komplexen Schermodul und den Phasenwinkel. Der komplexe Schermodul, aus dem sich mittels Division durch die Kreisfrequenz unmittelbar die komplexe Viskosität berechnen lässt, ist als Verhältnis zwischen

Spannung und Deformation ein Maß für die Bitumensteifigkeit. Der Phasenwinkel, gemessen als Verzögerung der Deformationsreaktion gegenüber der aufgetragenen Spannung, quantifiziert das Verhältnis zwischen elastischem und viskosem Verformungsanteil. Rein elastische Materialien weisen einen Phasenwinkel von 0° , rein viskose einen Phasenwinkel von 90° und Materialien mit beiden Anteilen einen entsprechend dazwischen liegenden Phasenwinkel auf.

3.1.3 Chemische Zusammensetzung

Der chemische Aufbau des Bitumens ist mit einer Vielzahl unterschiedlicher Kohlenwasserstoffverbindungen, die in vielen Fällen durch Heteroatome ergänzt werden, sehr komplex. Die Angaben zur Anzahl der vorkommenden Moleküle sind folglich nur grobe Schätzungen. So beziffert beispielsweise [ZHANG, GRIENFELD, 2007] deren Anzahl auf mehr als 100.000. Diese Moleküle bestehen zu einem Großteil aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Stickstoff und Sauerstoff treten in relativ geringen Mengen auf, während der Anteil des Schwefels einige Prozent betragen kann. Aufgrund der hohen Polarität kann der Schwefelgehalt, ebenso wie der Anteil an metallischen Bestandteilen wie Nickel oder Vanadium, die nur in kleinsten Spuren auftreten, für die Eigenschaften des Bitumens prägend sein. Eine grobe Angabe bezüglich des Auftretens der einzelnen Elemente ist Bild 3-7 zu entnehmen.

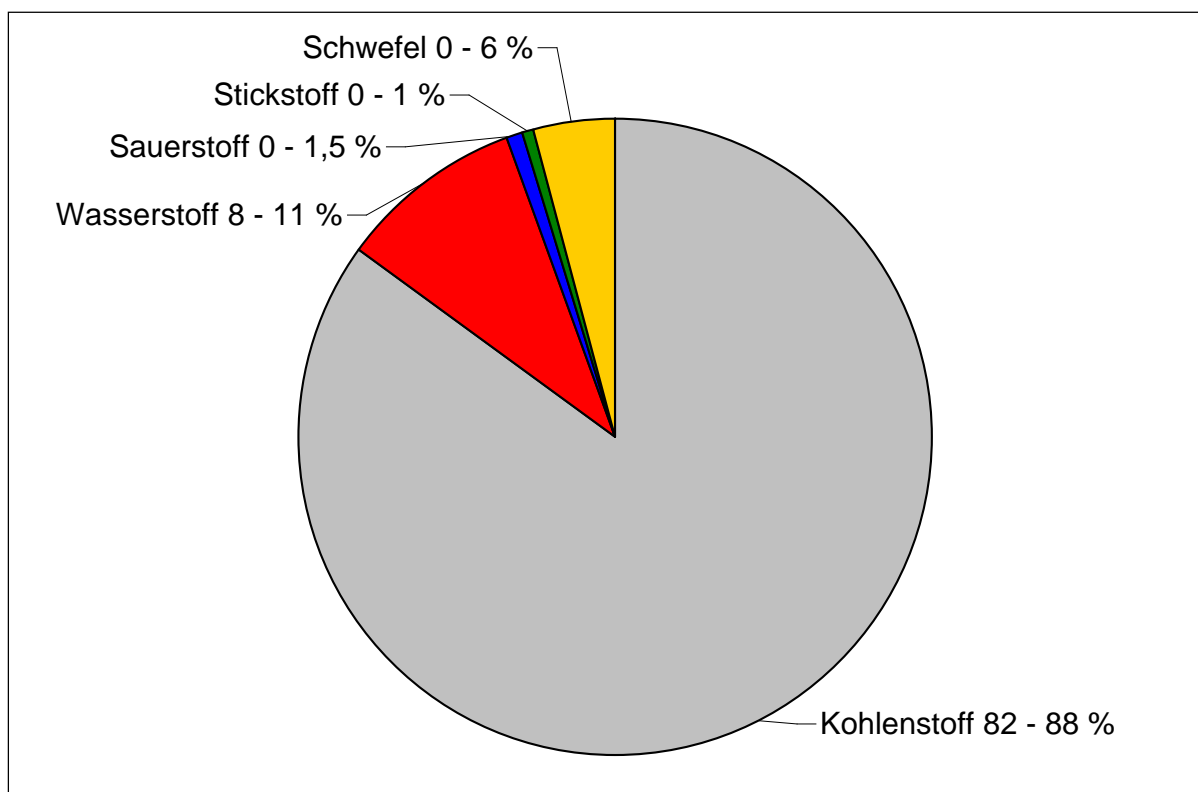


Bild 3-7: Mittlere chemische Zusammensetzung eines Bitumens [WHITEOAK; READ, 2003]

Die Angabe von Bandbreiten, in denen die Anteile der einzelnen Elemente vorkommen, anstelle von konkreten Werten ist darin begründet, dass die chemische Zusammensetzung der Bitumen von den jeweils verwendeten Rohölen abhängt. Deren elementarer Aufbau weist wiederum große Schwankungen aufgrund der in Kapitel 3.1.1 angedeuteten Entstehungsgeschichte des Rohöls auf. Neben den Schwankungen der

prozentualen Anteile der einzelnen Elemente entsteht so die zuvor grob bezifferte Vielzahl unterschiedlicher Moleküle.

Aufgrund dieser Vielfalt unterschiedlichster chemischer Verbindungen ist eine Charakterisierung des Bitumens anhand seiner elementaren Zusammensetzung nur in Teilaspekten (beispielsweise Anteil der metallischen Bestandteile) möglich und sinnvoll: „Ein Kolloidsystem – auch Bitumen – kann man von den Molekülen her, aus denen es besteht, nicht verstehen. Erst der kolloidale Aufbau mit Mizellstruktur lässt uns seine Eigenschaften erfassen“ [NEUMANN, 1995].

Das Kolloidsystem zur Beschreibung des Bitumens geht im Wesentlichen auf [NELLESTYN, 1923] zurück. Das Bitumen wird generell in eine zusammenhängende, fließfähige Phase (Maltene) und eine darin dispers verteilte Phase (Asphaltene) unterteilt. Die definitionsgemäße Unterscheidung zwischen den beiden Phasen beruht auf dem Lösungsverhalten. Asphaltene werden hierbei als der Anteil des Bitumens definiert, der in n-Heptan nicht löslich, aber in Toluol löslich ist, während die Maltene in n-Heptan löslich sind. Eine weitere, im Wesentlichen auf der Polarität der Bestandteile beruhende Aufteilung der Maltene geht auf die Forschungen von [CORBETT, 1969] zurück. Mittels Flüssigchromatographie teilte er die Maltene in Aliphaten (Saturates), Aromaten (Aromatics, ursprünglich naphthene aromatics) und Harze (Resins, ursprünglich polar aromatics bzw. auf Deutsch auch als polare Verbindungen bezeichnet) auf. Beruhend auf der Trennung der Bitumen nach [CORBETT, 1969] existieren einige Weiterentwicklungen der SARA-Analyse (**S**aturates, **A**romatics, **R**esins, **A**sphaltene). Im US-Amerikanischen Raum wird die Trennung mit sichereren, einfacher zu handhabenden und umweltfreundlicheren Substanzen nach [ASTM D 4124, 2009] standardisiert durchgeführt (Bild 3-8). Die verfahrenstechnischen Optimierungen von [SEBOR et al., 1999], bei denen die Gruppe der Aromaten zusätzlich in Mono-, Di- und Polyaromaten aufgeteilt wird, finden ebenfalls oft Anwendung. Andere Verfahren wie die Dünnschichtchromatographie mit Flammen-Ionisations Detektor (TLC-FID) oder in selteneren Fällen die Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) sind ebenfalls gebräuchlich. Bei geeigneter Kalibrierung auf die zuvor genannten Methoden werden mit diesen Verfahren im Allgemeinen vergleichbare Ergebnisse erzielt, wobei die Interpretation der Ergebnisse zu fehlerhaften Rückschlüssen führen kann.

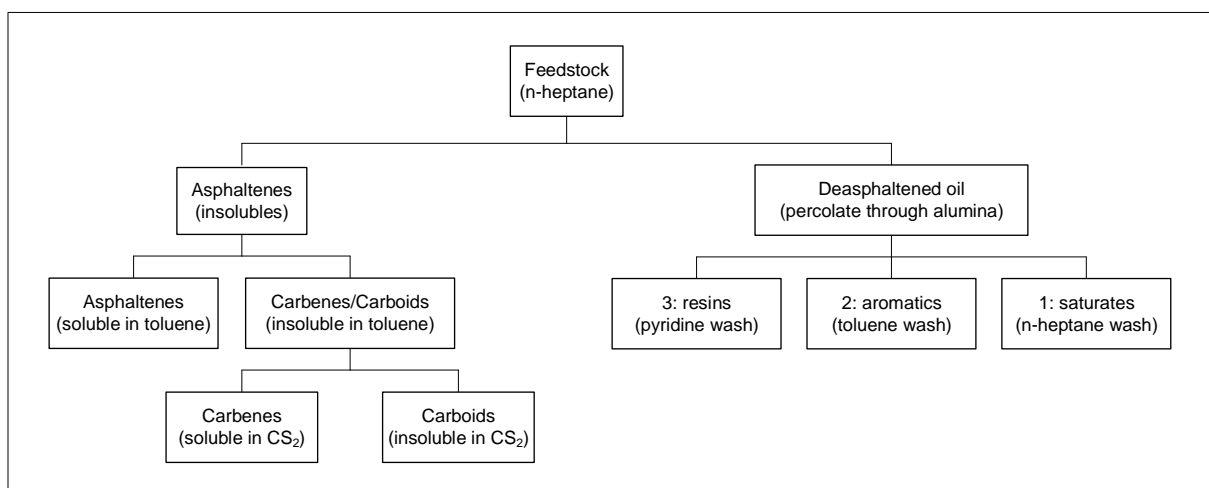


Bild 3-8: Vereinfachte Erdölfractionierungsmethode [SPEIGHT, 2004]

Die aliphatischen Verbindungen machen etwa 5 bis 15 M.-% des Bitumens aus. Sie sind annähernd farblos und bei Raumtemperatur flüssig mit einer Dichte von etwa $0,9 \text{ g/cm}^3$. Als gesättigte Kohlenwasserstoffverbindungen liegt das H/C-Verhältnis nahe 2 und es befinden sich nur Spuren von Heteroatomen in den Molekülketten.

Der Anteil der Aromaten wird mit 30 bis 45 M.-%, in anderen Quellen auch mit höheren Anteilen, am Bitumen beziffert. Die Angaben zur Farbe und Viskosität reichen von gelb und flüssig bis schwarz und hochviskos, jeweils bei Raumtemperatur. Die abwechselnden Angaben in der Fachliteratur sind durch die unterschiedliche Anzahl an Ringverbindungen (Aufteilung in Mono-, Di- und Polyaromaten) zu erklären. Die Dichte der aromatischen Verbindungen beträgt bei 20 °C etwa 1 g/cm^3 .

Der Anteil der polaren Verbindungen am Bitumen wird oft mit 30 bis 45 M.-% beziffert. In der Literatur teilweise davon abweichende Werte werden mit dem Einsatz unterschiedlicher Lösungsmittel begründet. Die polaren Verbindungen sind bei Raumtemperatur ein schwarzer Feststoff mit einer Dichte von $1,07 \text{ g/cm}^3$. Die chemische Zusammensetzung ist der der Asphaltene ähnlich [KOOTTS, SPEIGHT, 1975], wobei die Polarität sogar höher sein kann [PIÉRI, 1995].

Bei frischem Destillationsbitumen wird der Anteil der Asphaltene mit 5 bis 20 M.-% angegeben. Durch thermisch-oxidative Prozesse, beispielsweise durch natürliche Alterung oder durch Anblasen, steigt der Asphaltengehalt deutlich an. Die Asphaltene haben im Bitumen eine viskositätsbildende Rolle, da diese bis etwa 200 °C als festes schwarzes Pulver vorliegen [CLAUDY, et al., 1992]. Die Asphaltene und die polaren Verbindungen enthalten einen Großteil der Heteroatome des Bitumens.

Aufgrund der herausragenden Bedeutung der Asphaltene und der Tatsache, dass entscheidende Unterschiede zwischen den Asphaltene bestehen, werden diese oftmals weiter unterteilt. [ZENKE, 1989] nimmt zu diesem Zweck eine Trennung anhand der Löslichkeit vor und unterscheidet zwischen leicht-, mittel- und schwerlöslichen Asphaltene.

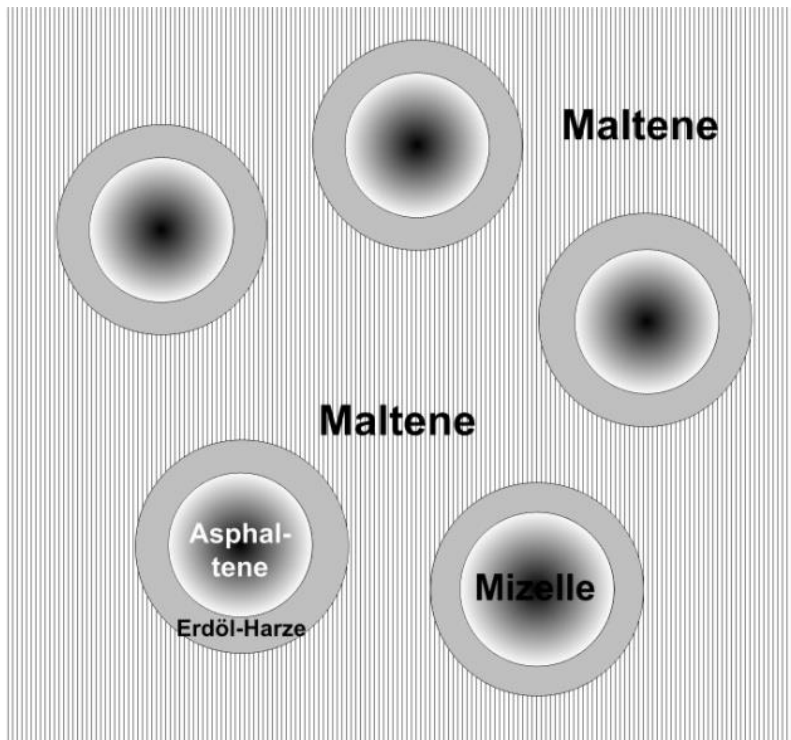


Bild 3-9: Mizellen-Modell [NÖSLER, 2000]

Die Rolle und die Verteilung der Asphaltene und Harze in der Kolloidstruktur des Bitumens sind in wesentlichen Aspekten bis heute umstritten. Nach dem Mizellen-Modell dienen die Harze als Schutzschicht für die Asphaltene (siehe Bild 3-9), während nach dem Yen-Mullins-Modell eine direkte Aggregatbildung zwischen den Asphaltene stattfindet und der Großteil der Harze in der Maltene-phase verteilt ist (siehe Bild 3-10).

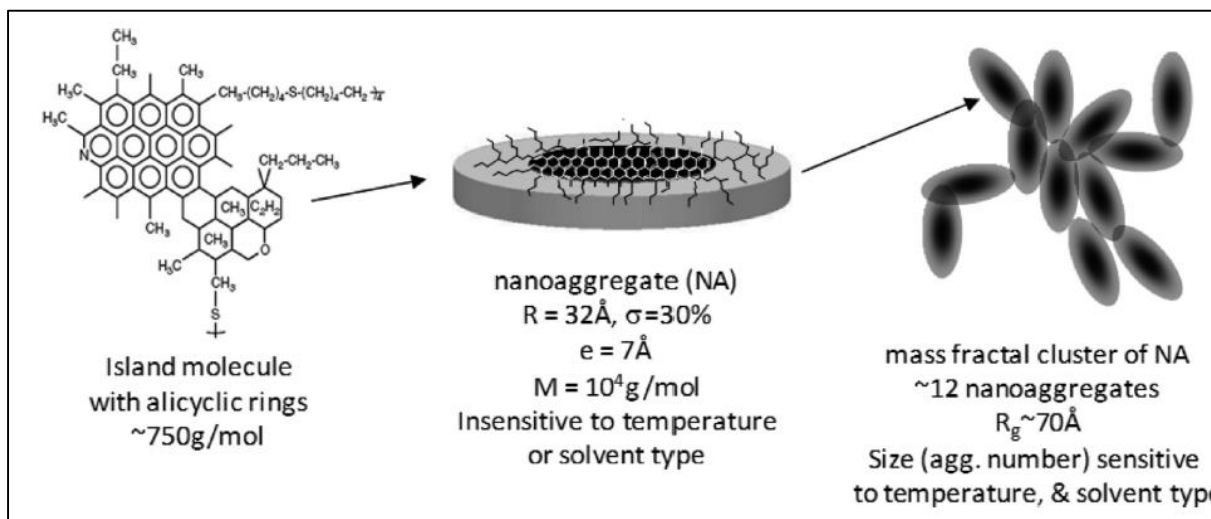


Bild 3-10: Yen-Mullins Modell [MULLINS, et al., 2012]

Im Gegensatz zu anderen Ansätzen hat sich die Trennung des Bitumens in die SARA-Fractionen zur chemischen Charakterisierung des Bitumens weitestgehend durchgesetzt. Daher werden Verhältniszahlen zwischen den vier Gruppen oft als Analyse-Parameter verwendet. Das bekannteste Beispiel hierfür ist der GAESTEL-Index (auch Kolloidal-Index) I_c , der das Verhältnis zwischen dispersen (Aliphaten und Asphaltene) und ausflockenden (Aromaten und Harze) Bestandteilen quantifiziert. Ein Beispiel für die Anwendung des GAESTEL-Index ist die Forderung nach möglichst geringen Werten,

um hierdurch die Kompatibilität zu Polymeren sicherzustellen, die teilweise auch auf die Kompatibilität zur Gesteinsoberfläche angewendet wird. Einem weiteren Ansatz zufolge kann der Quotient aus Harzen und Asphaltene zur Kontrolle der Bitumenprovenienz genutzt werden. Dieser Verhältniswert ist nach [LOEBER et al., 1998] bei Bitumen einer Familie unabhängig von der Härte.

3.2 Gestein

Gesteine bestehen aus überwiegend anorganischen, festen, kristallisierten Mineralen. Die meisten Gesteine sind dabei polymineralisch, d.h. bestehen aus mehreren Arten von Mineralen. Monomineralische Gesteine wie z.B. der Quarzit oder der Marmor sind seltener. Insgesamt gibt es etwa 4.600 bekannte Mineralarten, von denen jedoch nur ca. 250 gesteinsbildend sind. Wovon wiederum über 90 % Silicium-Verbindungen, d.h. Silikate und Quarz, sind. Neben den Mineralen zur Klassifizierung der Gesteine ist der Entstehungsprozess für die Einteilung von Gesteinen in magmatische Gesteine, Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine ausschlaggebend. [OKRUSCH, MATTHES, 2014]

Der Kreislauf der Gesteine ist in Bild 3-11 dargestellt.

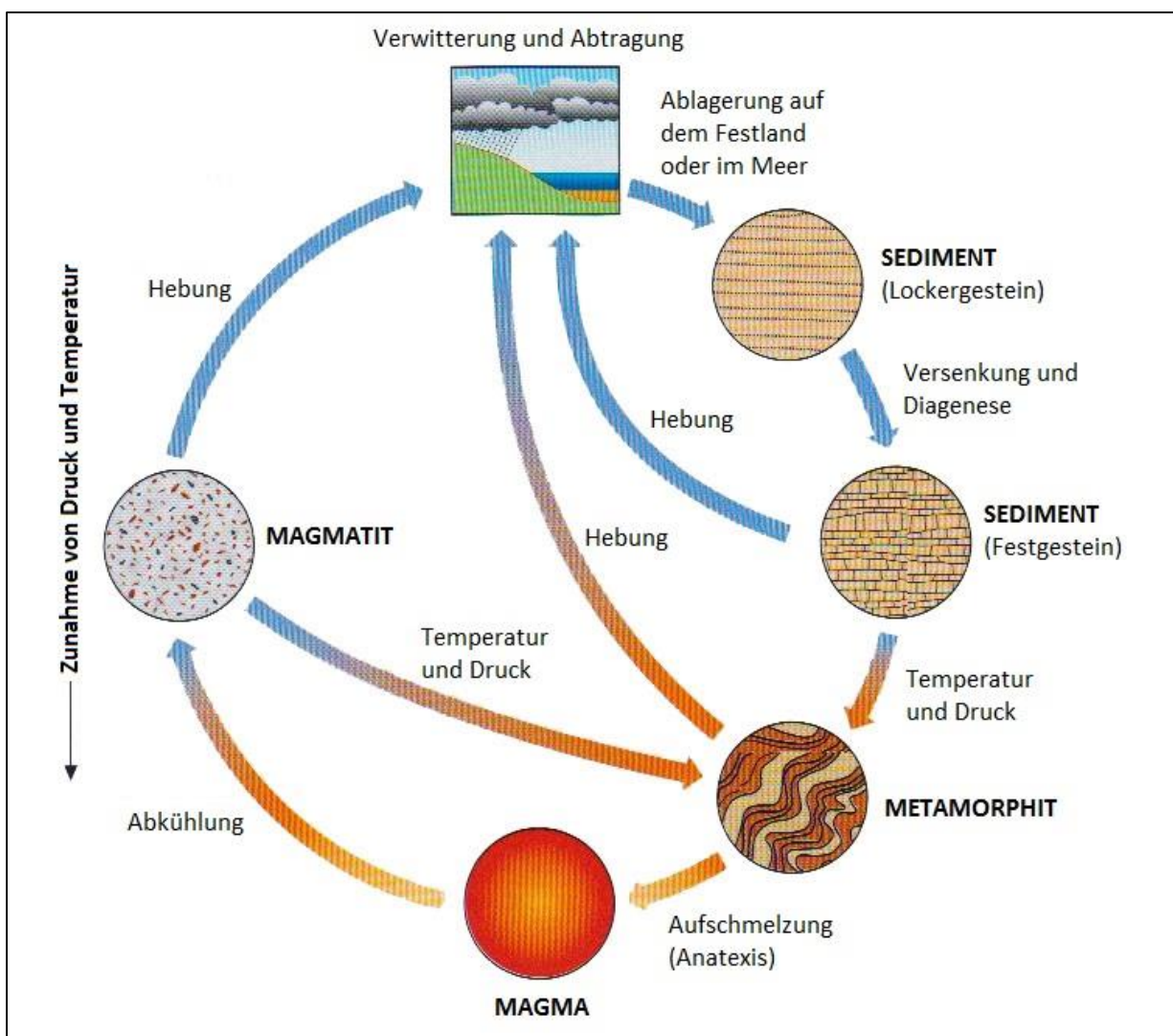


Bild 3-11: Der Kreislauf der Gesteine [OKRUSCH, MATTHES, 2014]

„Die Erdkruste besteht zu über 60 Vol.-% aus magmatischen Gesteinen“ [OKRUSCH, MATTHES, 2014]. In Tab. 3-1 ist eine Einteilung magmatischer Gesteine in sauer und basisch in Abhängigkeit von ihrem SiO₂-Anteil mit Beispielen gegeben.

Tab. 3-1: Gliederung magmatischer Gesteine in Abhängigkeit vom SiO₂-Gehalt [WEISE, OESER, 2010]

Bezeichnung	Sauer	Intermediär	Basisch	Ultrabasisch
SiO ₂ -Gehalt	> 65 % SiO ₂	52-65 % SiO ₂	45-52 % SiO ₂	< 45 % SiO ₂
Beispiele	Granit, Quarzporphyr	Syenit, Diorit, Trachyt, Andesit	Gabbro, Diabas, Basalt	Peridotit, Basalt

Ein Sedimentgestein, welches im Straßenbau eingesetzt wird, ist z.B. der Kalkstein. Durch metamorphe Prozesse entstehen aus älteren magmatischen oder Sedimentgesteinen metamorphe Gesteine. Ein Beispiel hierfür ist die Umwandlung von Quarzsandsteinen in Quarzite. [OKRUSCH, MATTHES, 2014]

In Tab. 3-2 sind bautechnisch wichtige magmatische Festgesteine, die üblicherweise im Straßenbau eingesetzt werden, ihre Eigenschaften und Hauptvorkommen zusammengefasst.

Tab. 3-2: Bautechnisch wichtige magmatische Festgesteine, ihre Eigenschaften und Hauptvorkommen [in Anlehnung an REUTER et al., 1992]

Name	Farbe	Hauptminerale	Gefüge	Druckfestigkeit [MN/m ²]	Rohdichte [t/m ³]
Granit, Granodiorit	hellgrau bis rotbraun	Quarz (> 10 %), Feldspat, Glimmer, [Hornblende, (< 10 %) Augit]	hypidiomorph-körnig, richtungslos	160 bis 300	2,6 bis 2,8
Diabas (Grüngestein)	schwarz bis dunkelgrün	Feldspat, Augit, (Hornblende)	krypto-kristallin, sperrig	180 bis 250	2,8 bis 2,9
Basalt (häufigstes Oberflächen-gestein 98%)	schwarz	Feldspat, -vertreter, Hornblende, Augit, Olivin, Einsprenglinge	krypto-kristallin, sperrig	250 bis 400	2,9 bis 3,0
Grauwacke	dunkelgrau	Quarz, Feldspat, Glimmer, Gesteinsbruchstücke	gebant, fein-grobkörnig	150 bis 300	2,6 bis 2,65
Kalkstein	grau, gelb, braun	Kalkspat	massig, bankig, bis feingeschichtet, dicht bis grobkörnig	20 bis 90	1,7 bis 2,85
Quarzit	weiß, grau	Quarz, (Serizit, Feldspat)	sehr hart, widerstandsfähig, spröde, oft massig	150 bis 300	2,7 bis 2,8

3.3 Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen

Ein unzureichendes Haftverhalten bzw. eine unzureichende Adhäsion zwischen Gestein und Bitumen führt meistens zu irreparablen Schäden an der Asphalttschicht. Heutzutage kommt dem Haftverhalten von Gestein und Bitumen eine immer größere Bedeutung zu, da das Budget der Kommunen und Straßenverwaltungen immer knapper wird. Schäden können durch eine gezielte Auswahl der Baustoffe möglicherweise von vornherein verhindert werden und damit die Lebensdauer der Straße erhöht werden. Das Forschungsthema „Adhäsion“ ist nicht neu; bereits seit Jahrzehnten wird die Adhäsion von Gestein und Bitumen national und international untersucht.

Zur Beschreibung des Haftverhaltens sind verschiedene Theorien bekannt, jedoch lässt sich das Haftverhalten nicht mit nur einer einzigen Theorie beschreiben, sondern immer durch das Zusammenspiel von mehreren. Die bedeutendsten Theorien sind nach [RENKEN, 2003] dabei folgende:

- **Thermodynamische Theorie oder auch Theorie der Grenzflächenenergien:**
Nach dieser Theorie wird die Adhäsion als thermodynamische Erscheinung verstanden, die von der Oberflächenenergie der Stoffe abhängt. Hierbei spielt die Polarität der Stoffe eine entscheidende Rolle, so werden polare Flüssigkeiten von der Oberfläche der Gesteinskörnungen stärker angezogen als nichtpolare Flüssigkeiten. [MAJIDZADEH, BROVOLD 1968]
- **Theorie der molekularen Orientierung:**
Die Haftung von Bitumen und Gestein beruht auf den unterschiedlichen Ladungszuständen an den Grenzflächen. Bei Kontakt mit Gestein orientieren sich die Bitumenmoleküle so, dass die Oberflächenenergien des Gesteins optimal gesättigt werden. [MACK, 1957]
- **Chemische Theorie:**
Die Haftung wird durch Reaktionen zwischen den chemischen Bestandteilen des Bitumens und des Gesteins begründet. [RICE, 1958]
- **Mechanische Theorie:**
Hiernach kommt es während des Mischvorgangs zu einer mechanischen Verzahnung des Bitumens mit dem Gestein, da das Bitumen in die Poren und Kapillaren des Gesteins eindringt. [McBAIN, HOPKINS, 1924]

Neben den verschiedenen Theorien, die dazu dienen das Haftverhalten Gestein - Bitumen zu beschreiben, gibt es ebenfalls unterschiedliche Ansätze, den Versagensmechanismus zu beschreiben. Dies sind folgende Theorien [MAJIDZADEH, BROVOLD 1968], [RENKEN, 2003]:

- **Verdrängungstheorie:**
Das Wasser verdrängt aufgrund seiner höheren Oberflächenspannung das Bitumen.
- **Unterwanderungstheorie:**
Auch bei einem intakten Bitumenfilm gelangt Wasser an die Grenzfläche zwischen Bitumen und Gestein. Entweder, das Wasser kommt aus dem Inneren,

da das Gestein noch feucht ist, oder es diffundiert von außen durch den Bitumenfilm. Die Unterwanderung kann ihre Ursache ebenfalls in der Verunreinigung des Gesteinskorns durch Staub haben.

- **Filmbruchtheorie:**
Wasser dringt durch einen mechanischen Bruch des Bitumenfilms durch äußere Lasteinwirkungen zur Gesteinsoberfläche vor.
- **Porendrucktheorie:**
Das Bitumen wird an der Grenzfläche zum Gestein durch den Druck, der entsteht, wenn Wasser durch den Reifen in den Asphalt gedrückt wird, abgelöst.

Generell ist festzuhalten, dass ein Adhäsionsversagen erst durch den Einfluss von Wasser möglich ist. Tab. 3-3 gibt einen Überblick über die weiteren vielzähligen Einflussfaktoren auf das Haftverhalten.

Tab. 3-3: Einflussgrößen auf das Haftverhalten in Anlehnung an [RENKEN, 2011; GROTHE, WISTUBA, 2010; HIRSCH, FRIEMEL-GÖTTLICH, 2009; LABIB, 1992]

Komponente	Einflussfaktoren
Gestein	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralogische/petrographische Zusammensetzung • Chemische Zusammensetzung • Oberflächenrauigkeit • Porosität • Verstaubung und Feuchtigkeitsfilm • Lösliche Salze
Bitumen	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächen-/Grenzflächenspannung • Viskosität • Provenienz, Säurezahl, Paraffingehalt • Alterungsverhalten • Polymermodifizierung, Haftverbesserer
Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur, Frost-Tau-Wechsel • Chemische Inhaltsstoffe, gelöste Salze • pH-Wert

Im Folgenden werden kurz einige Erkenntnisse hinsichtlich der verschiedenen Einflussfaktoren, die in den jeweils genannten Forschungsvorhaben gewonnen wurden bzw. aus der Literatur bekannt sind, zusammengefasst.

- Saure Gesteine sind meist haftkritisch, während basische Gesteine sich meist positiv auf die Haftung auswirken. Je höher der Quarz- bzw. SiO₂-Anteil desto haftkritischer ist das Gestein. [MAJIDZADEH, BROVOLD 1968]
- Raue und poröse Gesteinsoberflächen sind vorteilhaft [MAJIDZADEH, BROVOLD 1968].
- Staubpartikel und Feuchtigkeitsfilme wirken sich negativ auf die Adhäsion aus [RENKEN, 2003].
- Entgegen früheren Aussagen in der Literatur zeigten [HARDERS, NÖSLER, 2003] mit dem Spurbildungstest, dass durch eine Abnahme der Oberflächenenergie der

Gesteinskörnungen - basierend auf den Lagerungszeiten auf offener Halde - eine Verbesserung des Verformungswiderstandes erreicht wird.

- Nach [MC CANN et al., 2005] ist die wichtigste Gesteinseigenschaft zur Abschätzung der Wasserempfindlichkeit die Säure-Unlösbarkeitszahl. Gute Korrelationen zwischen diesem Kennwert haben die Autoren mit dem Kalziumanteil, dem Siliciumgehalt, dem Glühverlust und dem Zeta-Potential festgestellt. Somit können diese Kennwerte auch anstelle der Säure-Unlösbarkeitszahl zur Vorhersage genutzt werden.
- Eine niedrige Viskosität des Bitumens wirkt sich positiv auf die Benetzungsfähigkeit des Bitumens aus, da die Oberflächenspannung geringer ist, jedoch lassen sich Bitumen mit einer hohen Viskosität schwerer von Wasser verdrängen [MAJIDZADEH, BROVOLD 1968].
- Die Säurezahl des Bitumens begünstigt die Adhäsion, während ein hoher Paraffingehalt das Adhäsionsverhalten verschlechtert [RENKEN, 2003].
- [JADA, SALOU, 2002] zeigten, dass der Kontaktwinkel bei Bitumen mit einem hohen Asphaltengehalt und/oder Bitumen mit einem geringen Verhältnis von Harzen zu Asphalteneen höher ist. Ein hoher Kontaktwinkel steht für eine schlechtere Benetzungsfähigkeit des Bitumens. Die Adhäsionsarbeit nimmt mit abnehmenden Verhältnis von Harzen zu Asphalteneen ab. Weiterhin stellten [JADA, SALOU, 2002] fest, dass Bitumen mit einem hohen Asphaltengehalt eine geringere Polarität aufweisen als andere.
- [KHUDYAKOVA et al., 1992] konnten fast keinen Einfluss der chemischen Eigenschaften des Bitumens auf das Adhäsionsverhalten feststellen. Sie untersuchten 16 Bitumen verschiedener Härte und unterschiedlichen Provenienzen aus der damaligen UdSSR mit zwei verschiedenen Gesteinen.

4 Untersuchungsmethodik

4.1 Auswahl der Materialien

4.1.1 Bitumen

Für das Projekt wurden in Summe 90 Bitumenproben der Sorten 20/30, 30/45, 50/70, 70/100 und 160/220 beschafft. In einem ersten Schritt wurden acht über die Bundesrepublik Deutschland verteilte Asphaltmischanlagen ausgewählt (die den Lieferbereich der acht deutschen Raffinerien abdecken) und von Ende 2011 bis Mitte 2012 jeweils eine Probe des Bitumens der Sorte 50/70 bei Anlieferung an dem Tankkraftwagen entnommen. Von diesen acht Proben wurden die physikalischen Eigenschaften und die chemischen Zusammensetzungen bestimmt. Für die weitere Beprobung wurden sechs Asphaltmischanlagen ausgewählt, die eine große Bandbreite der chemischen Eigenschaften erwarten ließen.

In dem zweiten Schritt der Beprobung wurden 82 Bitumenproben entnommen. Die Beprobung erfolgte von Juli 2012 bis Dezember 2013. Während der Beprobung wurde festgestellt, dass das Bitumen der Sorte 30/45 wesentlich seltener verwendet wird, als bei der ursprünglichen Antragsstellung angenommen. Aus diesem Grund wurde die Bitumensorte 160/220 zusätzlich mit in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Von jeder Bitumensorte wurden zum Vergleich auch Proben direkt von den Raffinerien, die die jeweilige Mischanlage beliefern, zur Verfügung gestellt. Die Anzahl wurde jedoch auf eine Probe je Sorte und Raffinerie beschränkt.

Die Bezeichnung der Proben wurde wie folgt gewählt:

z.B.: 4.6 50/70

Die erste Ziffer steht für die Provenienz bzw. Raffinerie (Nr. 1 bis 8), die zweite Ziffer steht für den Zeitpunkt der Entnahme (Nr. 1 bis 7) und dahinter die jeweilige Bitumensorte. Weiterhin gibt es Proben, die an der zweiten Stelle ein R stehen haben folgend von der Ziffer 1, dies kennzeichnet die Proben, die direkt von der Raffinerie und nicht über eine Mischanlage bezogen wurden (z.B. 2.R1 50/70).

In Tab. 4-1 ist eine Übersicht der entnommenen Bitumenproben in Abhängigkeit von der Provenienz und Bitumensorte gegeben.

Tab. 4-1: Übersicht der entnommenen Bitumenproben

Provenienz/Raffinerie	20/30	30/45	50/70	70/100	160/220	Entnahme
1	x	x	x	x	x	1
	x	x	x	x	x	2
	Raffinerie	Raffinerie	Raffinerie	x	Raffinerie	3
	x	x	x	Raffinerie	x	4
	x	x		x	x	5
	x			x		6
				x		7
2	x	Raffinerie	x	x	x	1
	x		x	x	x	2
	Raffinerie		x	Raffinerie	Raffinerie	3
	x		x		x	4
	x		Raffinerie			5
3			x	Raffinerie	Raffinerie	1
			Raffinerie			2
4			x	Raffinerie	Raffinerie	1
			x	x		2
			Raffinerie	x		3
			x	x		4
			x	x		5
			x			6
			x			7
			x			8
5	x		x	x		1
	x		Raffinerie	Raffinerie		2
				x		3
				x		4
						5
6	Raffinerie	Raffinerie	x	Raffinerie	Raffinerie	1
			Raffinerie			2
7			x	x		1
			x	x		2
			x	x		3
			x	Raffinerie		4
			Raffinerie	x		5
8			x	Raffinerie		1
			Raffinerie			2
Summe	14	7	30	27	12	90
Soll	10	20	25	25	10	90
Differenz	+4	-13	+5	+2	+2	0

4.1.2 Gesteine

Für die Auswahl von vier Gesteinen für die Adhäsionsversuche, die ein möglichst unterschiedliches Haftverhalten aufweisen sollen, wurden die folgenden acht Gesteinsarten, die in Deutschland im Straßenbau üblicherweise verwendet werden, untersucht.

- Diabas
- Grauwacke
- Basalt
- Rhyolith
- Kalkstein
- Granit
- Moräne
- Quarzit

Dabei wurde auch berücksichtigt, dass die ausgewählten Gesteine eine gute geographische Abdeckung der in Deutschland typischen Gesteinsarten aufweisen. Von allen Gesteinen wurden die Lieferkörnungen 0/2 mm, 2/5 mm, 5/8 mm und 8/11 mm sowie größere Gesteinsstücke für die Gesteinsansprache durch die jeweiligen Steinbrüche bereitgestellt und die Gesteinseigenschaften (siehe Kapitel 4.3) bestimmt.

4.2 Bitumenuntersuchungen

Die 90 ausgewählten Straßenbaubitumen wurden im frischen Zustand chemisch und physikalisch untersucht. Dazu wurden die Veränderungen wesentlicher physikalischer Eigenschaften sowie die Änderung der Bitumenmasse aufgrund einer Kurzzeitalterung bestimmt. Die Kurzzeitalterung wurde mit dem weltweit zu diesem Zweck angewendeten Rolling-Thin-Film-Oven-Test (RTFOT) nach [DIN EN 12607-1, 2013] simuliert.

4.2.1 Prüfverfahren zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften

Die detaillierte Analyse der physikalischen Bitumeneigenschaften wurden zum einen mit den klassischen Prüfverfahren durchgeführt, an deren Einhaltung nach den [TL Bitumen-StB 07, 2013] Anforderungen gestellt werden. Zum anderen wurden die Bitumen mit verfahrenstechnisch anspruchsvolleren, stärker an der Bitumenrheologie orientierten Verfahren analysiert.

Die drei klassischen Prüfverfahren Nadelpenetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel und Brechpunkt nach Fraaß wurden entsprechend [DIN EN 1426, 2006], [DIN EN 1427, 2006] bzw. [DIN EN 12593, 2006] durchgeführt. Die beiden erstgenannten Prüfverfahren wurden sowohl an den frischen als auch an den nach [DIN EN 12607-1, 2013] kurzzeitgealterten Bitumen vorgenommen, während der Brechpunkt nach Fraaß lediglich am frischen Bitumen bestimmt wurde.

Mit dem Kraftduktilitätsverfahren nach [DIN EN 13589, 2010] wurde das Streckverhalten im frischen Zustand analysiert. Zur einheitlichen Bewertung werden Bitumen gleicher Sorte bei jeweils identischen Temperaturen untersucht: 20/30 bei 25 °C, 30/45 und 50/70 bei 15 °C, 70/100 bei 10 °C, 160/220 bei 5 °C und Polymermodifizierte Bitumen bei 10 °C.

Das Kälteverhalten wurde mit dem Brechpunkt nach Fraaß sowie der Biegekriechsteifigkeit und dem m-Wert mit dem Biegebalken-Rheometer (BBR) nach [DIN EN 14771,

2013] charakterisiert. Hierbei wurde als einheitliche Prüftemperatur, abweichend von den Vorgaben der [TL Bitumen-StB 07,2013], -16 °C gewählt.

Die rheologischen Kenngrößen komplexer Schermodul, komplexe Viskosität und Phasenwinkel wurden entsprechend [DIN EN 14770, 2013] ermittelt. Das in den [TL Bitumen-StB 07,2013] gegebene Temperaturspektrum wurde erweitert. Die Untersuchungen wurden bei Temperaturen von -10 bis +150 °C, jeweils bei einer Frequenz von 1,59 Hz, durchgeführt.

Neben der komplexen Viskosität, die bei Straßenbaubitumen im newtonschen Zustand der dynamischen Viskosität entspricht, wurde bei den Polymermodifizierten Bitumen die dynamische Viskosität nach [DIN EN 13702-1, 2010] zwischen 100 und 150 °C bestimmt.

4.2.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der frischen Straßenbaubitumen wurde ausgehend von drei für die Charakterisierung des Bitumens relevanten Ansätzen untersucht.

Der Paraffingehalt, der als Anteil der Kohlenwasserstoffe, die „in einem 50%igen Ether-Ethanol-Gemisch (Volumenanteil) bei Temperaturen bis -20 °C kristallisieren und einen Schmelzbereich oberhalb 25 °C“ haben, definiert wird, wird mittels destruktiver Destillation nach [DIN EN 12606-1, 2006] bestimmt.

Eine Aufspaltung des Bitumens in chemisch ähnliche Gruppen wurde in Anlehnung an [SEBOR, 1999] durchgeführt. Hierbei findet eine Aufspaltung der Bitumen mittels Flüssigchromatographie in einer Säule statt, die vor allem auf der unterschiedlichen Polarität beruht. Bei dieser SARA-Analyse findet eine Trennung in Aliphaten (Saturates), Mono-, Di- und Polyaromaten (Aromatics), Harze (Resins, im Deutschen meist als polare Verbindungen bezeichnet) und Asphaltene (Asphaltens) statt. Hierzu werden die Asphaltene im ersten Schritt abgetrennt, indem das Bitumen in Isooctan versetzt, diese Mischung gekocht und nach dem Abkühlen filtriert wird. Die verbleibende Maltene-phase wird in eine Säule überführt. Diese Säule ist mit Aluminiumoxid und Kieselgel (jeweils mit Isooctan gesättigt) gepackt. Zum Lösen der Aliphate, Mono-, Di- bzw. Polyaromate und polare Verbindungen werden die folgenden fünf Elutionsmittel als mobile Phasen über die Säule geführt:

- Reines Isooctan
- Isooctan / Toluol im Verhältnis 19 / 1
- Isooctan / Toluol im Verhältnis 17 / 3
- Reines Toluol
- Toluol / Diethylether / Methanol im Verhältnis 1 / 1 / 3

Die Asphaltene wurden in einem separaten Verfahren entsprechend der Anleitung von [ZENKE, 1989] in drei Gruppen unterteilt: leicht-, mittel- und schwerlösliche Asphaltene. Jede Gruppe wird durch ein dreimaliges Lösen und Fällern mit unterschiedlich zusammengesetzten Lösungs- und Fällungsmitteln abgetrennt. Für eine exakte Beschreibung des Versuchsablaufs wird auf [ZENKE, 1989] verwiesen.

Mittels Gaschromatographie wurden die Straßenbaubitumen bezüglich ihrer thermischen Stabilität untersucht. Entsprechend dem von [THIMM, 2003] beschriebenen Verfahren werden die Bitumen in eine Säule (Schlauch) gegeben, in der sie kontinuierlich aufgeheizt werden. Die gelösten Verbindungen werden durch einen Detektor am Ende der Säule erfasst und den dazugehörigen Temperaturen zugeordnet. Das temperaturabhängige Siedeverhalten der Bitumen lässt Rückschlüsse auf die Verteilung der Molekülgrößen der Kohlenwasserstoffverbindungen im Bitumen zu.

4.3 Gesteinsuntersuchungen

Zur Auswahl von vier Gesteinen für die Adhäsionsversuche wurden als Grundlage die folgenden Kennwerte ermittelt:

- Korngrößenverteilung [DIN EN 933-1, 2012] und
- Rohdichte der Lieferkörnungen [DIN EN 1097-6, 2013],
- Reindichte zur Berechnung der Porosität,
- Mineralogisch-petrografische Zusammensetzung mittels Röntgendiffraktometrie,
- Quarzgehalt und
- Spezifische Oberfläche an der Fraktion 8/11 mm (berechnet).

4.4 Versuche zum Haftverhalten

4.4.1 Rolling-Bottle-Test

Der Rolling-Bottle-Test wurde entsprechend [DIN EN 12697-11, 2012] durchgeführt. Als Gesteinskörnung wurde die Kornklasse 8/11 mm ausgewählt. Der Umhüllungsgrad wurde nach 6, 24 und 48 h bestimmt. Auf eine Ermittlung des Umhüllungsgrades nach 72 h wurde verzichtet, da bei dieser Prüfdauer der mechanische Einfluss sehr hoch ist. Wie in Bild 4-1 zu sehen, kommt es durch Kornabrieb zu einer Erhöhung der Kreisförmigkeit.

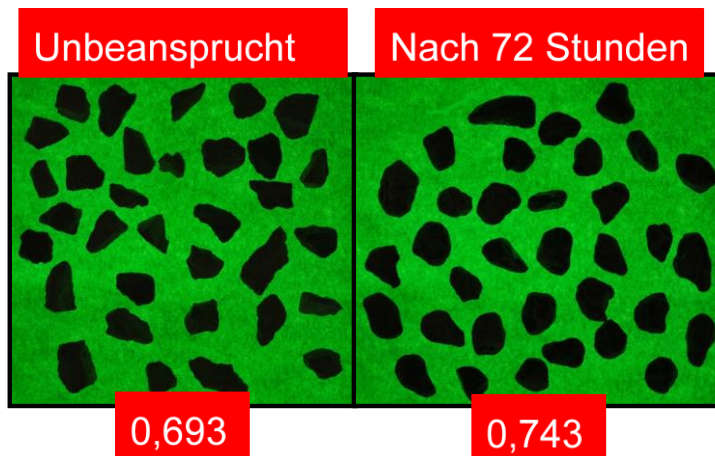


Bild 4-1: Einfluss der Prüfdauer beim Rolling-Bottle-Versuch auf die Kreisförmigkeit [RUBE, GEHRKE, 2013]

4.4.2 Schüttelabriebversuch

Beim Schüttelabriebversuch wurde das Prüfgerät gemäß [DIN EN 12274-7, 2005] verwendet. Das Schüttelabriebgerät ist in Bild 4-2 zu sehen.



Bild 4-2: Schüttelabriebgerät

Abweichend von der [DIN EN 12274-7, 2005] wurden die Probekörper aus Gesteinskörnungen 0,5/2 mm einer Gesteinsart hergestellt. Die Lieferkörnung 0/2 mm wurde dazu über dem 0,5 mm Sieb ausgesiebt und ausgewaschen. Damit wurde der Einfluss von Eigenfüller und anderen Staubpartikeln auf die Adhäsion ausgeschlossen.

Für die Probenherstellung wurden die Formen entsprechend [DIN EN 12274-7] verwendet. Die Probekörper wurden mit einer statischen Presse weggeregelt bis zum Erreichen der Endhöhe von 25 mm verdichtet. Die dafür benötigte Kraft variierte dabei in Abhängigkeit von der Gesteinsart. Die Einwaage wurde durch Vorversuche auf 33 ± 3 g festgelegt. Der Bindemittelgehalt wurde in Vorversuchen mit dem Diabas so gewählt, dass ein Hohlraumgehalt von 32 ± 2 Vol.-% erreicht wird. Bei den anderen Gesteinen wurde der Bindemittelgehalt über den Faktor α ($\alpha = \frac{2,650}{\rho_P}$) angepasst. Letztlich wurde bei der Probekörperherstellung bei allen Gesteinen ein Hohlraumgehalt von 33 ± 3 Vol.-% erreicht.

Die Probekörper wurden anschließend entsprechend [DIN EN 12274-7, 2005] in einen der Schüttelzylinder mit 750 ml frischem Leitungswasser (pH-Wert 7) gegeben und bei einer Geschwindigkeit von 20 U/min bis zu einer Gesamtzahl von 3.600 Umdrehungen in der Schüttelvorrichtung gedreht. Nach der Belastung werden die Probekörper bis zur Massekonstanz getrocknet und der Abrieb durch den Vergleich der Masse vor und nach der Prüfung berechnet.

4.4.3 Bestimmung der Wasserempfindlichkeit

Die Wasserempfindlichkeit wurde entsprechend [TP Asphalt StB 07, Teil 12] bei 15 °C an Marshall-Probekörpern (MPK) bestimmt. Entgegen der [TP Asphalt StB 07, Teil 12] wurden die MPK mit 100 Schlägen verdichtet. Es wurde jedoch eine Mischgutrezeptur in Anlehnung an den SMA 8 LA [Entwurf E LA D, 2014] gewählt, der von vornherein einen höheren Hohlraumgehalt aufweist, um ein Adhäsionsversagen im gesamten

Probekörper zu provozieren. Auf die Zugabe von Füller wurde auch bei diesem Prüfverfahren verzichtet, um diesen weiteren Einflussfaktor auf die Adhäsion auszuschließen. Der Bindemittelgehalt wurde über den Faktor α ($\alpha = \frac{2,650}{\rho_P}$) angepasst.

Von den Probekörpern wurde neben dem Verhältniswert ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) der statischen Spaltzugfestigkeit (indirekte Zugfestigkeit) von wassergelagerten und trockenen Probekörpern in Prozent auch das Ermüdungsverhalten bei mittlerer Belastung mit dem Spaltzug-Schwellversuch bestimmt.

4.4.4 Kontaktwinkelmessungen

Die Kontaktwinkelmessungen wurden mit dem Gerät DSA 10 der Firma Krüss durchgeführt.

Mit diesem Gerät kann sowohl die Messung des Kontaktwinkels mit der „Sessile-Drop-Methode“ (Liegender Tropfen) als auch die Bestimmung der Oberflächenenergie mit der „Pendant-Drop-Method“ (Hängender Tropfen) erfolgen. So können die Gesteine durch vier verschiedene Prüflösungen, die durch eine automatische Dosiereinheit auf eine Oberfläche aufgebracht werden, untersucht werden. Zusätzlich lässt sich unter Verwendung eines Hochtemperaturdosiersystems (Typ DO3040) und einer Hochtemperaturmesszelle (Typ TC 20) die Wechselwirkung zwischen dem Bitumen und den Gesteinen analysieren.

Der Kontaktwinkel wurde zwischen den verschiedenen Bitumen und polierten Gesteinsoberflächen gemessen. Aus gröberen Gesteinsbrocken wurden dazu Gesteinsplatten gesägt und poliert, um den Einfluss der Gesteinsrauheit und Porosität auszuschließen. Die Messungen wurden bei Äquiviskositätstemperatur (EVT) der Bitumen durchgeführt. Die EVT wurde über die DSR-Ergebnisse so bestimmt, dass ein komplexer Schermodul von 209 Pa vorliegt. Bei diesem komplexen Schermodul wurde eine gute Tropfenbildung erzielt. Weiterhin wurde die Oberflächenspannung der Gesteine und Bitumen bestimmt.

In Bild 4-3 sind die Zusammenhänge zwischen dem Kontaktwinkel bzw. Kontaktwinkel und der Benetzung für verschiedene Winkel vergleichend dargestellt. Je kleiner der Kontaktwinkel ist, desto besser ist die Benetzung.

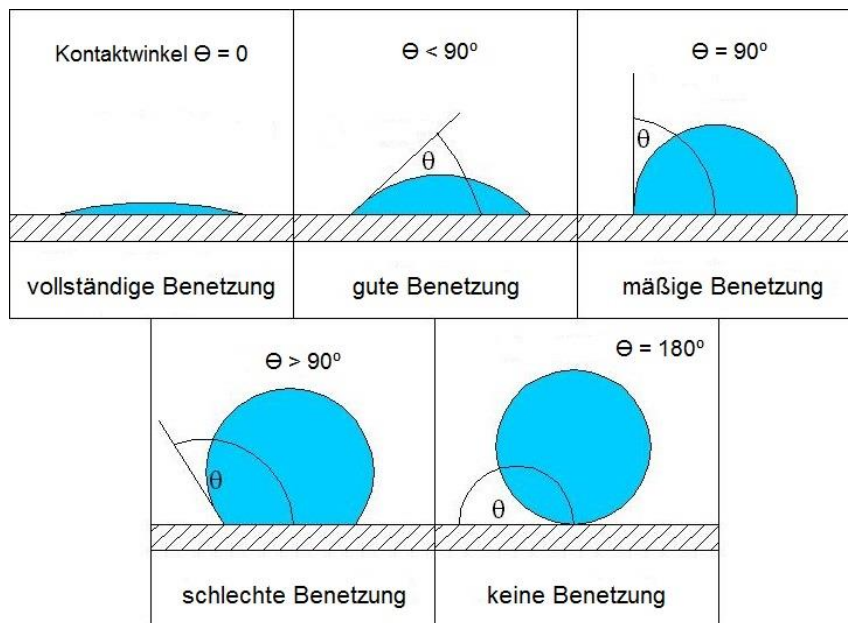


Bild 4-3: Qualität der Benetzung in Abhängigkeit vom Kontaktwinkel [KORN, 2004]

4.5 Einfluss der Polymermodifizierung von Bitumen auf das Haftverhalten

Neben den reinen Straßenbaubitumen wurden die Adhäsionsversuche auch an Polymermodifizierten Bitumen durchgeführt. Eindeutige Rückschlüsse auf den Einfluss der Polymerzusätze wurden durch das Beimischen handelsüblicher Produkte zu einem der bereits untersuchten Straßenbaubitumen, dem Bitumen 2.1 50/70, sichergestellt. Mit drei unterschiedlich aufgebauten Styrol-Butadien-Styrol (SBS) Polymeren, zwei Ethylenvinylacetaten (EVA) und einem bereits mit Bitumen gemischten Ethylencopolymerisaten (ECB) wurden drei Elastomere und drei Thermoplaste verwendet, die SBS- und das ECB-Polymer wurden jeweils zu 3 M.-% mit dem gewählten Bitumen 2.1 50/70 homogen vermischt, beim EVA reichte bereits ein Zugabeanteil von 1,2 M.-% aus, um die gleiche Viskosität wie bei den anderen PmB zu erreichen.

Ob sich eine Modifizierung positiv auf das Haftverhalten auswirkt, wurde mit dem Rolling-Bottle-Test und dem Schüttelabriebversuch überprüft.

5 Versuchsergebnisse

5.1 Bitumen

Aufgrund der sehr großen Datenmenge wird in diesem Kapitel auf eine tabellarische Darstellung aller Ergebnisse verzichtet. Die detaillierten Ergebnisse sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

In Bild 5-1 sind die normgerecht aus Doppel- bzw. Dreifachbestimmungen gemittelten Untersuchungsergebnisse der Nadelpenetration und des Erweichungspunktes Ring und Kugel der frischen Straßenbaubitumen dargestellt. Durch die farbliche Kennzeichnung wird die klare Abgrenzung der verschiedenen Bitumensorten anhand dieser Kennwerte deutlich.

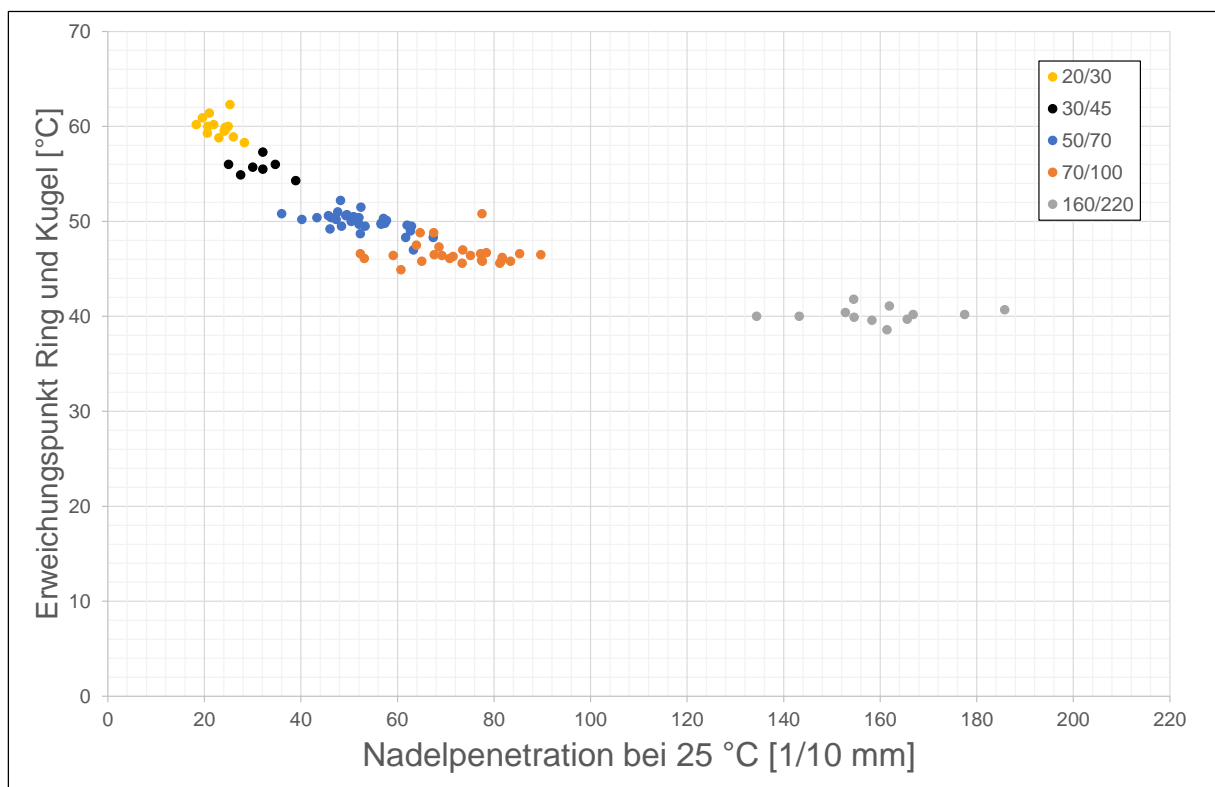


Bild 5-1: Nadelpenetration bei 25 °C und Erweichungspunkt Ring und Kugel der untersuchten Straßenbaubitumen

Zur Darstellung der Wirkung der Elastomere und Plastomere sind in Tab. 5-1 die Ergebnisse der Nadelpenetration und des Erweichungspunktes Ring und Kugel der modifizierten Bitumen sowie des zur Modifizierung verwendeten Basisbitumens 2.1 50/70 zusammengefasst.

Tab. 5-1: Ergebnisse der Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel der modifizierten Bitumen

Bitumen	Nadelpenetration [1/10 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
2.1 50/70	50	50,0
2.1 50/70 + Elastomer A	38	57,0
2.1 50/70 + Elastomer B	38	59,8
2.1 50/70 + Elastomer C	39	59,0
2.1 50/70 + Plastomer A	41	55,8
2.1 50/70 + Plastomer B	47	56,6
2.1 50/70 + Plastomer C	48	55,0

Die Auswirkungen einer Kurzzeitalterung nach dem RTFOT-Verfahren auf die Nadelpenetration und den Erweichungspunkt Ring und Kugel sind Bild 5-2 zu entnehmen. Die prozentuale verbleibende Nadelpenetration und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel sind in Abhängigkeit von der Bitumensorte farblich gekennzeichnet.

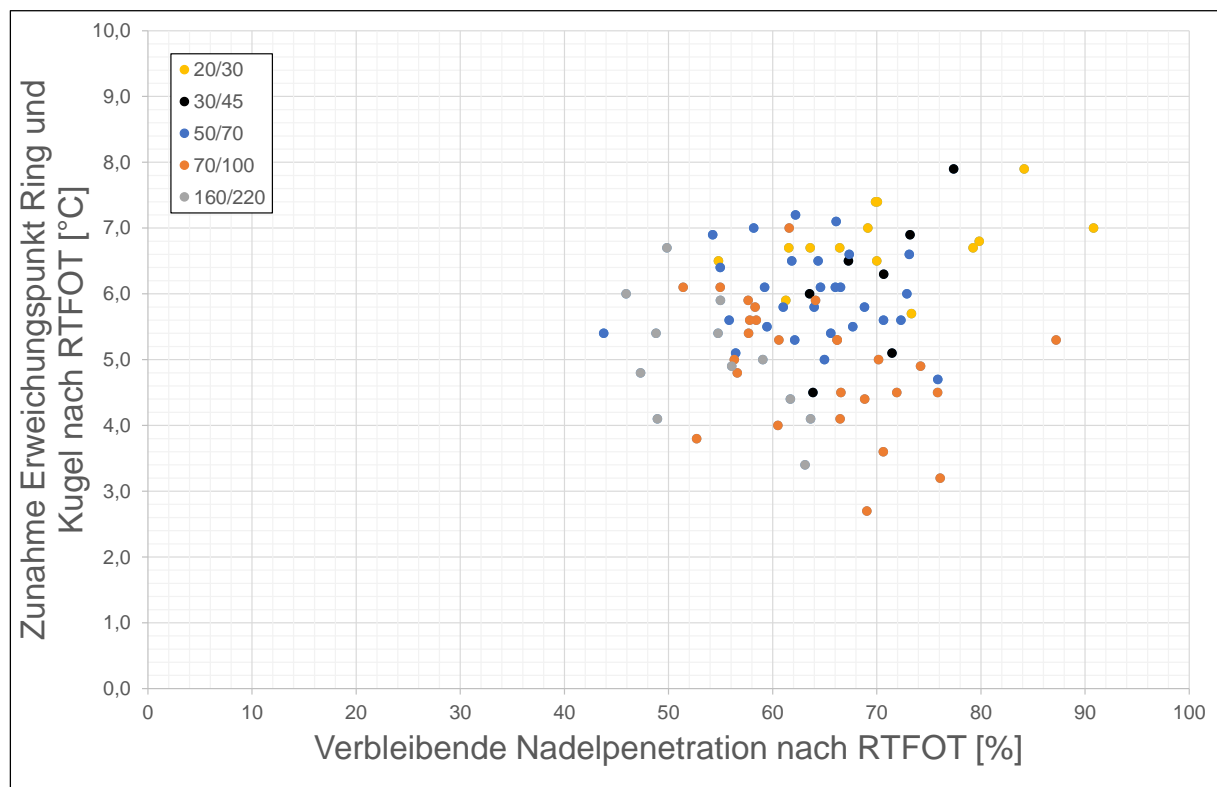


Bild 5-2: Auswirkungen einer Kurzzeitalterung (RTFOT): Verbleibende Nadelpenetration bei 25 °C und Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel der untersuchten Straßenbaubitumen

Zur Analyse des Kälteverhaltens wurden bei den frischen Straßenbaubitumen der Brechpunkt nach Fraaß sowie die Biegekekriecheifigkeit und der m-Wert bestimmt. Dem Bild 5-3 sind die Brechpunkte der Bitumen zu entnehmen. Die verschiedenen Bitumensorten sind hierbei farblich gekennzeichnet.

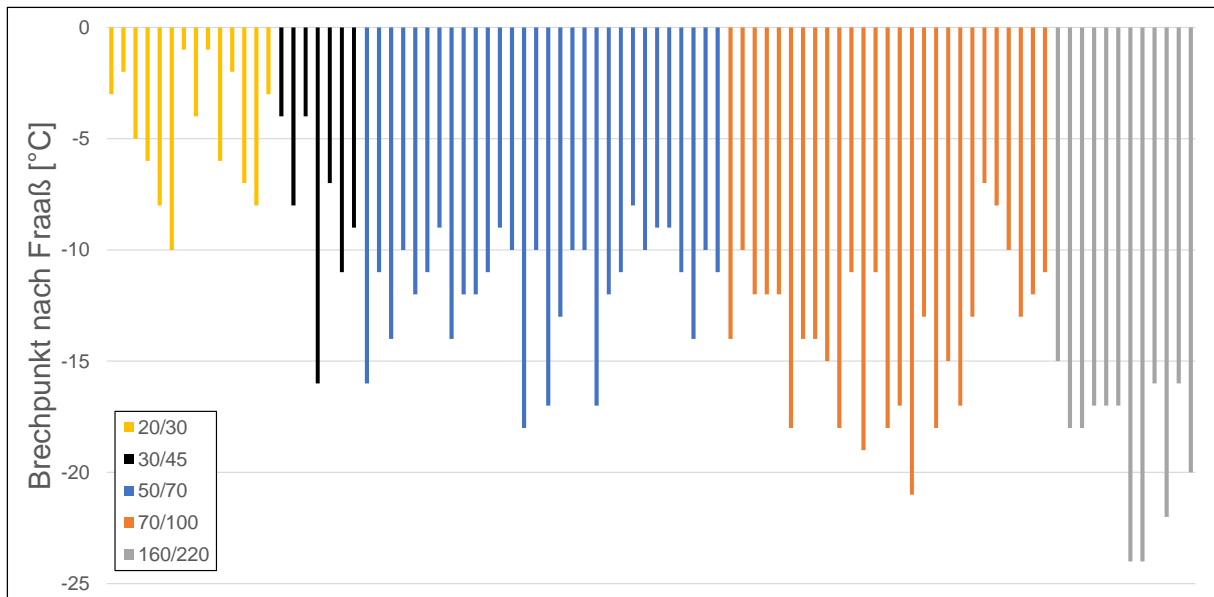


Bild 5-3: Brechpunkt nach Fraaß der untersuchten Straßenbaubitumen

Die Bestimmung der Biegebruchsteifigkeit und des m-Wertes mittels BBR erfolgte bei einer Temperatur von -16 °C . Zur Auswertung wurden in Bild 5-4 die Kennwerte nach einer Belastungszeit von 60 s zusammengefasst.

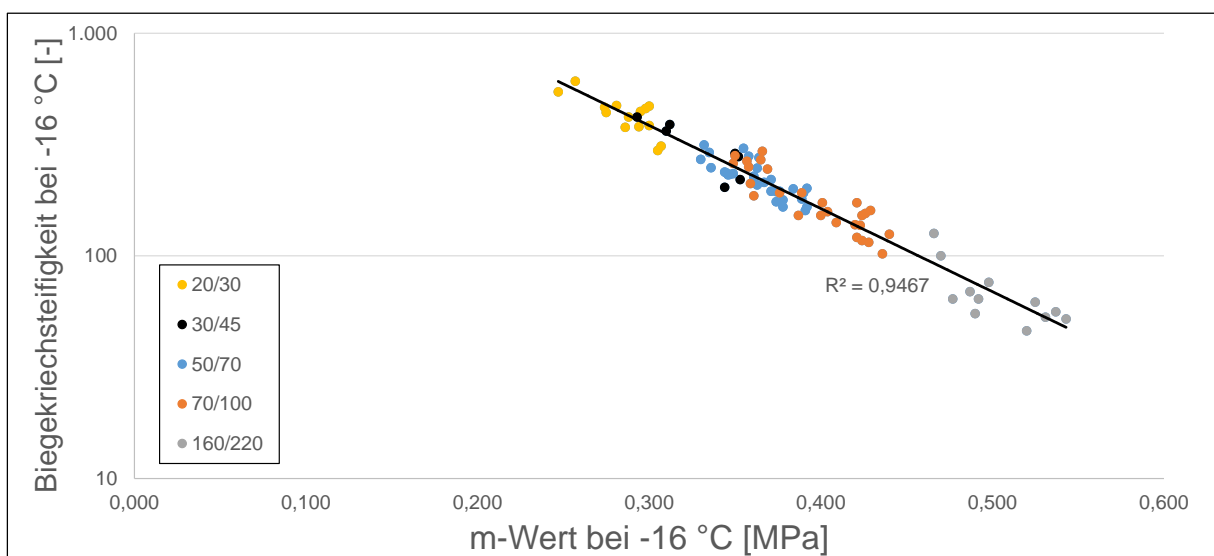


Bild 5-4: m-Wert und Biegebruchsteifigkeit (jeweils bei -16 °C) der untersuchten Straßenbaubitumen

In Bild 5-5 und Bild 5-6 sind die rheologischen Größen komplexer Schermodul und Phasenwinkel der frischen Straßenbaubitumen jeweils in Abhängigkeit von der Mess-temperatur zusammengefasst. Die ebenfalls mittels DSR bestimmten rheologischen Größen der Polymermodifizierten bzw. gealterten Bitumen sind zur Verdeutlichung separat in den Bildern 6-10 und 6-11 bzw. 6-30 und 6-31 dargestellt.

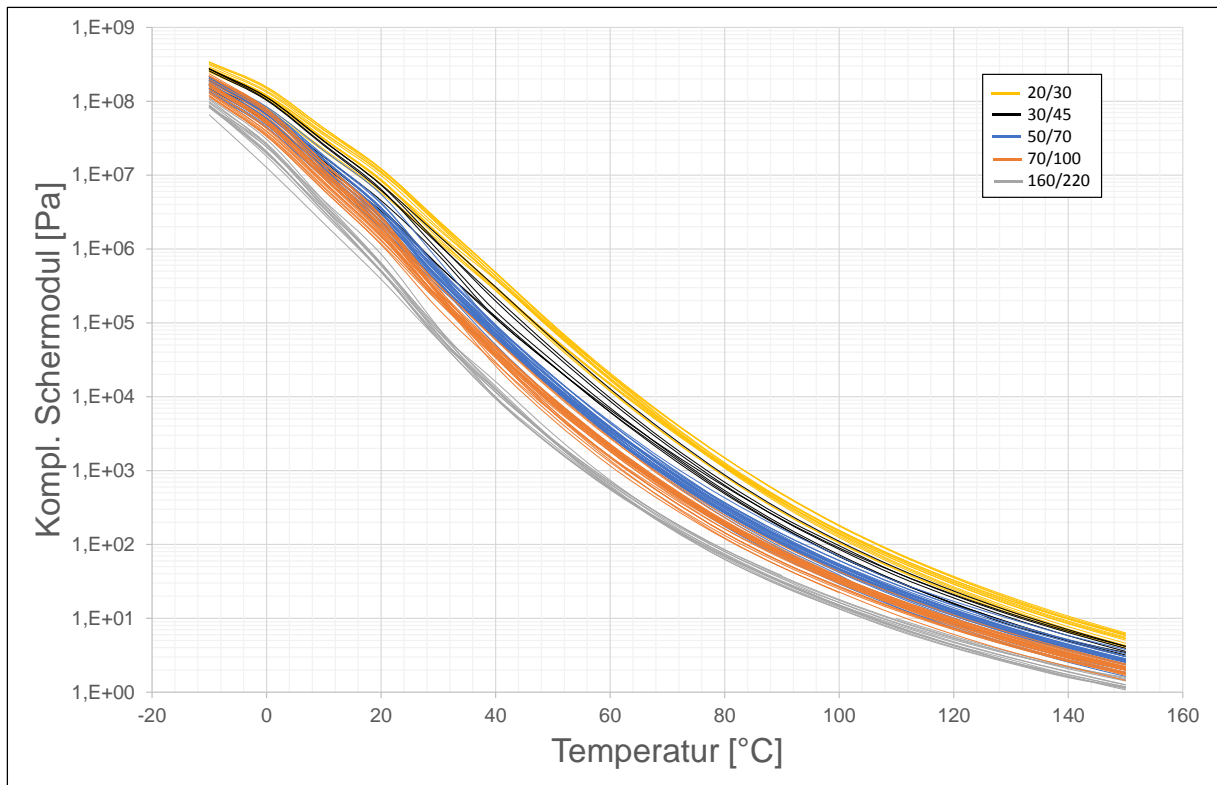


Bild 5-5: Temperaturabhängige komplexe Schermoduln der untersuchten Straßenbaubitumen

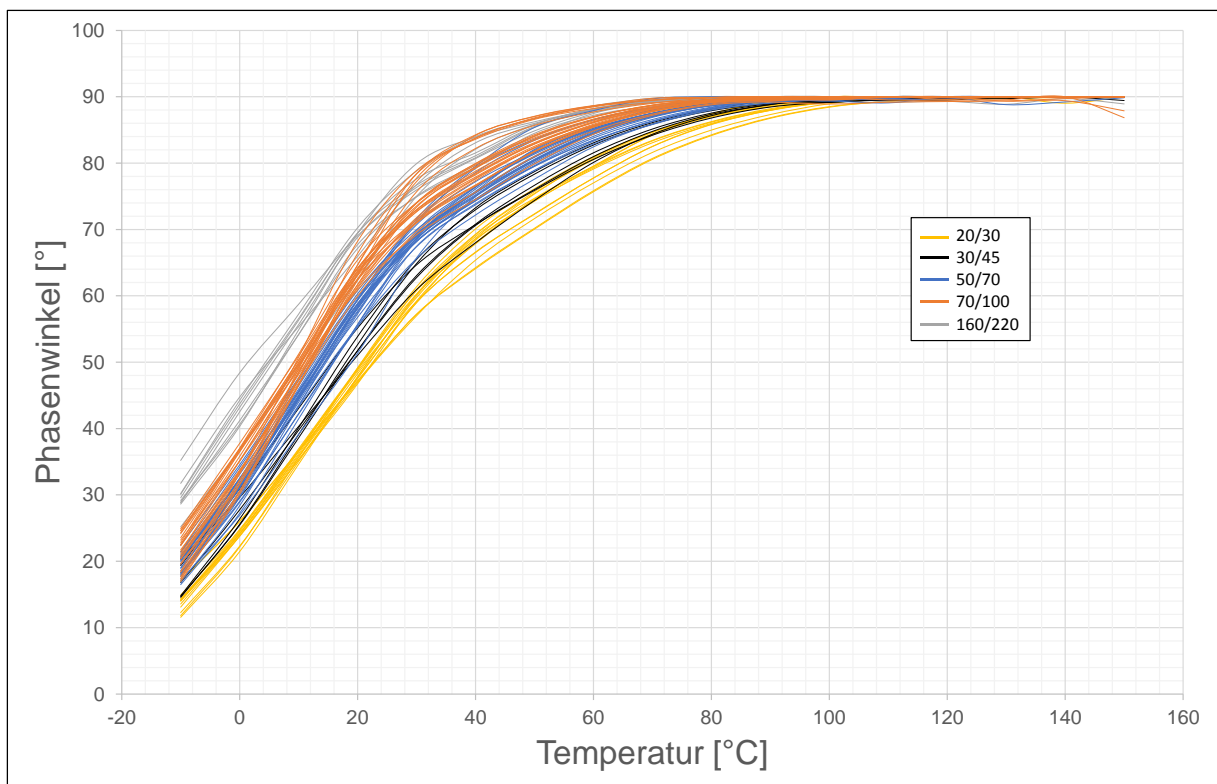


Bild 5-6: Temperaturabhängige Phasenwinkel der untersuchten Straßenbaubitumen

Die im Rahmen des Forschungsprojektes ermittelten Kennwerte zur chemischen Zusammensetzung sind in Bild 5-7 bis Bild 5-9 zusammengefasst. Die Paraffingehalte der untersuchten Straßenbaubitumen sind Bild 5-7 zu entnehmen.

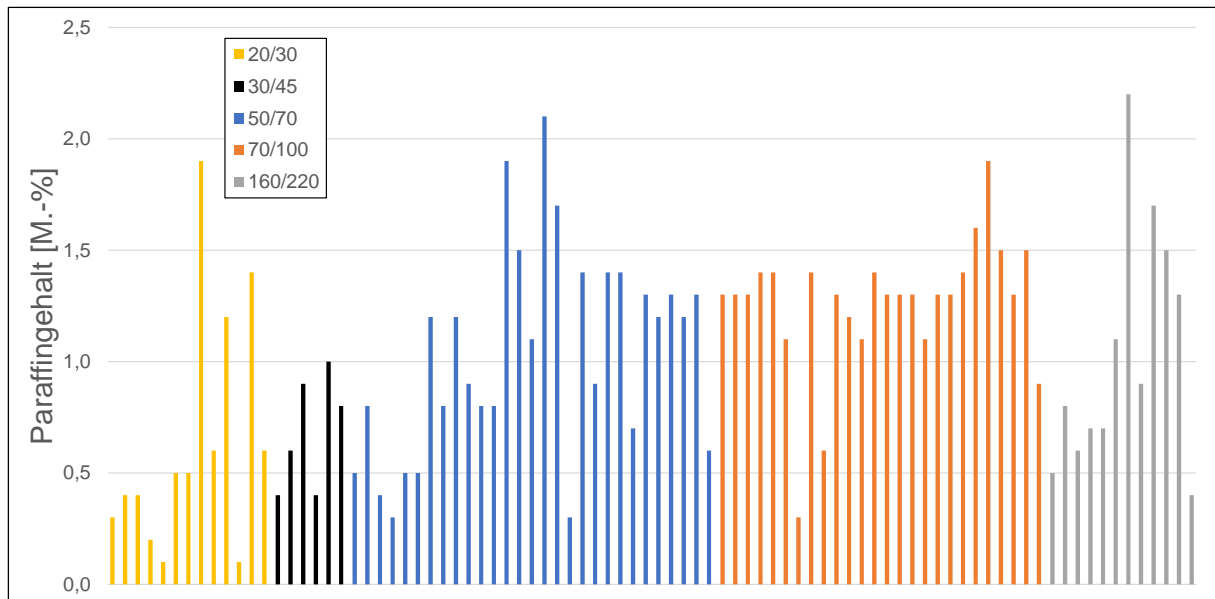


Bild 5-7: Paraffingehalte der untersuchten Straßenbaubitumen

In Bild 5-8 sind die Ergebnisse der SARA-Analyse und des Asphaltstatus nach ZENKE zusammengefasst. Für jede Bitumensorte sind hierbei die durchschnittlichen Anteile der Aliphaten, Mono-, Di- und Poly-Aromaten, der polaren Verbindungen sowie der leicht-, mittel- und schwerlöslichen Asphaltene dargestellt. Zudem ist jeweils die Spanne zwischen dem niedrigsten und höchsten gemessenen Wert angegeben.

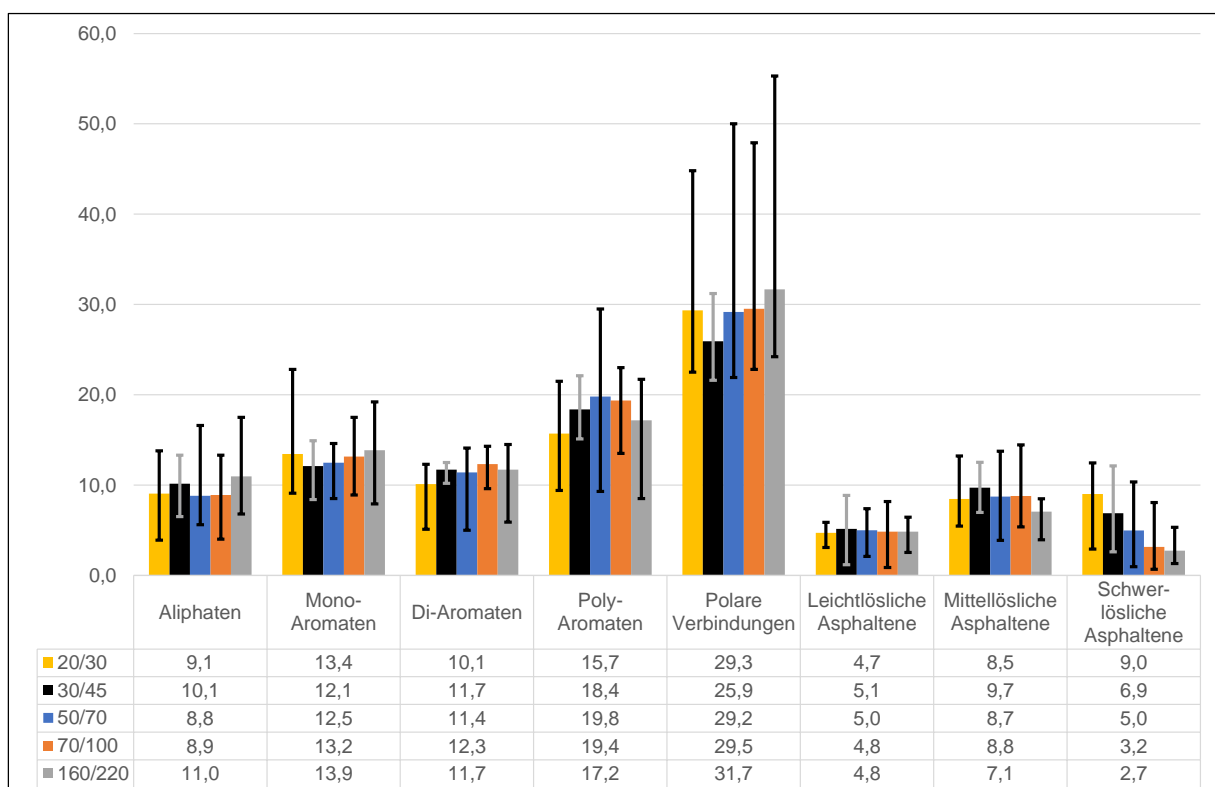


Bild 5-8: Chemischen Zusammensetzungen der untersuchten Straßenbaubitumen anhand der SARA-Analyse und des Asphaltstatus nach ZENKE; je Bitumensorte die Mittelwerte sowie das Minimum und das Maximum

Die Ergebnisse der Siedeanalyse sind Bild 5-9 zu entnehmen. Hierbei ist der Siedeanteil in Abhängigkeit von der Versuchszeit dargestellt. Der Versuchszeit ist ein einheitliches Temperaturprogramm zugeordnet: zu Versuchsbeginn beträgt die Ofentemperatur 45 °C. Nach Ablauf einer Minute wird eine Erwärmung mit einem Temperaturgradienten von 7,5 °C pro Minute durchgeführt. Die Ofentemperatur ist bei der gaschromatographischen Analyse jedoch nicht mit der Siedetemperatur des Bitumens selbst gleichzusetzen.

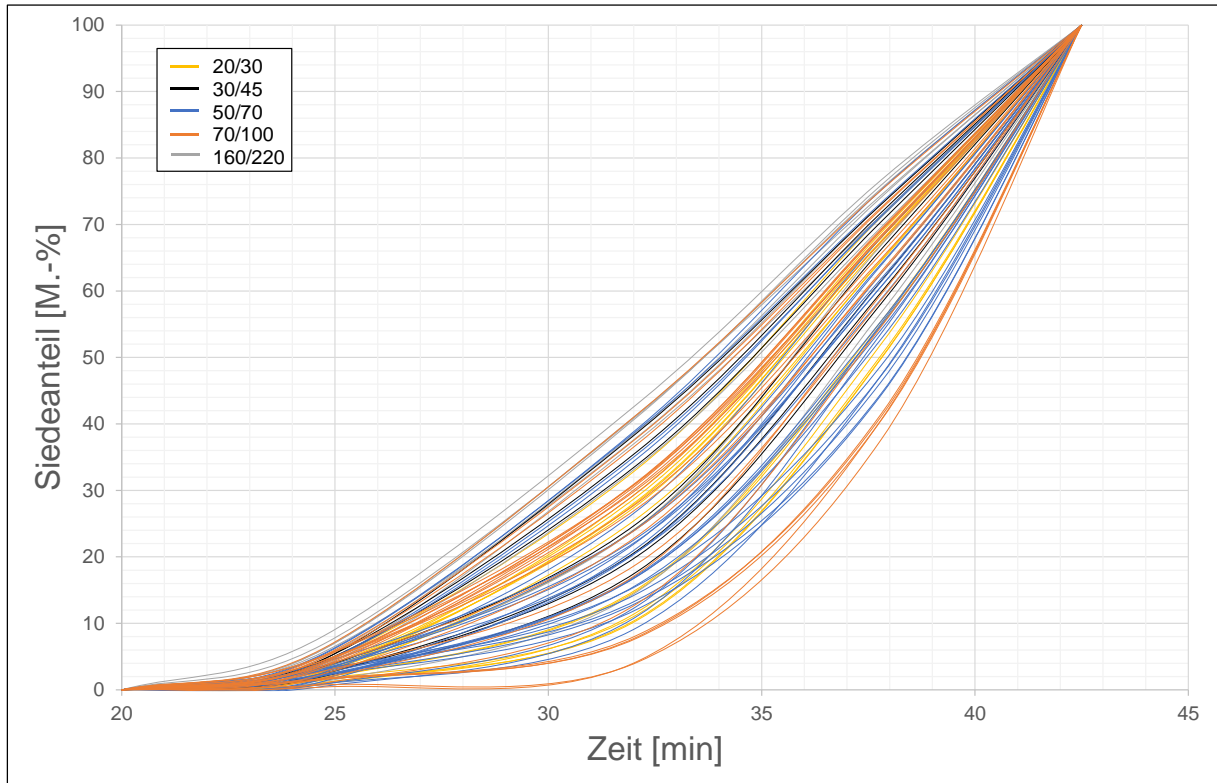


Bild 5-9: Ergebnisse der Siedeanalysen der untersuchten Straßenbaubitumen

5.2 Gesteinskörnungen

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen und Rohdichten der Lieferkörnungen sind im Anhang 2 aufgeführt. In Tab. 5-2 sind die Quarzanteile der verschiedenen Gesteine zusammengefasst, diese wurden mittels Röntgenbeugung semi-quantitativ ermittelt.

Tab. 5-2: Quarzanteile der Gesteine

	Basalt	Diabas	Granit	Grauwacke	Kalkstein	Rhyolith	Moräne
Quarzanteil [%]	0	10 - 15	20 - 30	50 - 60	5	20	60

Der Tab. 5-3 sind die Ergebnisse der Reindichte, Porosität und spezifischen Oberfläche der Lieferkörnung 8/11 mm zu entnehmen. Die spezifische Oberfläche wurde mit der folgenden Formel unter der Annahme eines Formbeiwertes von $a_f = 8$ berechnet:

$$O = \sum_i O_i = \frac{a_f}{\rho_{Rg}} \cdot \sum_i \left(\frac{10 \cdot a_i}{d_{m,i}} \right) \left[\frac{m^2}{kg} \right]$$

mit: O	[m ² /kg]	spezifische Oberfläche
O _i	[m ² /kg]	Oberfläche der Korngruppe i
ρ _{Rg}	[kg/m ³]	mittlere Kornrohichte der Gesteinskörnung
d _{m,i}	[mm]	mittlerer Korndurchmesser der Korngruppe i = $\sqrt{(d_{u,i} \cdot d_{o,i})}$
d _{u,i} /d _{o,i}	[mm]	unterer bzw. oberer Korndurchmesser der Korngruppe i
a _i	[M.-%]	Anteil der Korngruppe i
a _f	[-]	Formbeiwert

Tab. 5-3: Reindichte, Porosität und spez. Oberfläche der Lieferkörnung 8/11 mm

Kennwert	Einheit	Basalt	Diabas	Granit	Grauwacke	Kalkstein	Rhyolith
Reindichte	[g/cm ³]	3,024	2,881	2,658	2,754	2,739	2,658
Porosität der Lieferkörnung 8/11 mm	[%]	2,1	0,7	1,0	1,7	0,9	0,3
Spezifische Oberfläche 8/11 mm	[m ² /kg]	0,288	0,298	0,324	0,315	0,314	0,322

Zur Bestimmung des Mineralbestands wurde eine repräsentative Teilmenge jeder Probe bei 40 °C getrocknet, gemahlen und eine Röntgendiffraktometeraufnahme angefertigt. Die Grafiken der Röntgendiffraktometrie der Gesteine sind im Anhang 2 dargestellt. In Tab. 5-4 sind die ermittelten Mineralphasen den jeweiligen Gesteinen zugeordnet.

Tab. 5-4: Mineralische Zusammensetzung der Gesteinsproben

Mineralphasen qualitativ	Basalt	Diabas	Granit	Grauwacke	Kalkstein	Rhyolith	Moräne
Olivin (Fe-haltiger Forsterit)	X	-	-	-	-	-	-
Klinopyroxen (D=Diopsid/A=Augit)	X _D	X _A	-	-	-	-	-
Mg-Hornblende	-	X	-	-	-	-	-
Plagioklas (Albit=Ab bzw. Andesin=An)	X _{An}	X _{Ab}	X _{Ab}	X _{Ab}	-	X _{Ab}	X _{Ab}
Kalifeldspat (wahrscheinlich Mikroklin)	-	-	X	X	-	X	-
Orthoklas	-	-	-	-	-	-	X
Spinell (Titanomagnetit Ti-haltiger Magnetit)	X	-	-	-	-	-	-
Quarz	-	X	X	X	X	X	X
Chlorit (Clinochlor) (V= Chlorit oder Vermikulit)	-	X	X	X	-	X _V	-
Muskovit (B=Muskovit oder/und Biotit bzw. I=Muskovit/Illit)	-	X	X _B	X	-	X _B	X
Calcit	-	-	-	-	X	-	X
Dolomit	-	-	-	-	X	-	-

*die Reihenfolge der Mineralphasenlistung gibt keinen Aufschluss über die quantitative Verteilung der Phasen

5.3 Versuche zum Haftverhalten

5.3.1 Ausgewählte Materialien

Zur Auswahl der Gesteine für die Adhäsionsversuche wurde der Rolling-Bottle-Test zunächst mit allen zur Verfügung stehenden Gesteinen und einem Bindemittel (2.1 50/70) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 5-10 vergleichend dargestellt.

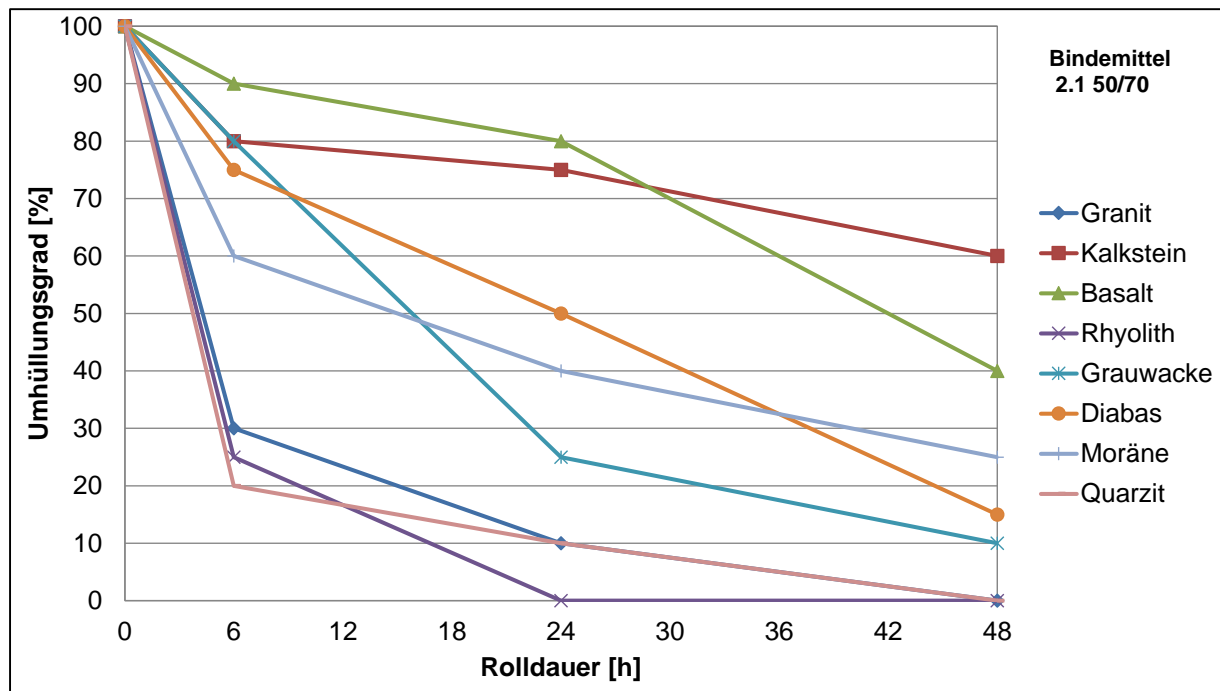


Bild 5-10: Ergebnisse des Rolling-Bottle-Tests zur Auswahl der Gesteine für weitere Adhäsionsversuche

Für die weiteren Adhäsionsversuche wurden die Gesteine Basalt, Diabas, Grauwacke und Rhyolith ausgewählt.

Der ausgewählte Rhyolith ist demnach ein sehr haftkritisches Gestein, während der Basalt im Rolling-Bottle-Test sehr gute Umhüllungsgrade erzielte. Dem Basalt wurde gegenüber dem Kalkstein der Vorzug gegeben, da dieser im Straßenbau oft als grobe Gesteinskörnung verwendet wird, während der Kalkstein als grobe Gesteinskörnungen überwiegend nur in Tragschichten eingesetzt wird. Der Diabas lässt sich als neutrales Gestein einstufen und die Grauwacke als tendenziell eher haftkritisches Gestein. Bei folgenden Prüfverfahren werden Rhyolith und Basalt verwendet:

- Rolling-Bottle-Test nach [DIN EN 12697-11, 2012]
- Schüttelabriebversuch nach [DIN EN 12274-7, 2005]
- Bestimmung der Wasserempfindlichkeit nach [TP Asphalt StB 07, Teil 12]
- Kontaktwinkelmessungen

Basierend auf der chemischen Zusammensetzung wurden die in Tab. 5-5 aufgeführten Bitumen für die Adhäsionsversuche ausgewählt. Mit diesen Bitumen wird die größtmögliche Bandbreite der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Bitumen abgedeckt.

Tab. 5-5: Für die Adhäsionsversuche ausgewählte Bitumen

Bitumensorte	Ausgewählte Bitumenproben
20/30	1.2, 2.1, 2.2
30/45	2.R1, 6.R1
50/70	1.1, 1.2, 2.1, 2.2
70/100	2.1, 5.1, 7.1
160/220	1.2, 2.1, 2.2

5.3.2 Rolling-Bottle-Test

In Bild 5-11 bis Bild 5-14 sind die Ergebnisse des Rolling-Bottle-Tests für eine Rolldauer von 6 h, 24 h und 48 h der verschiedenen Gesteine und Bitumen aufgeführt.

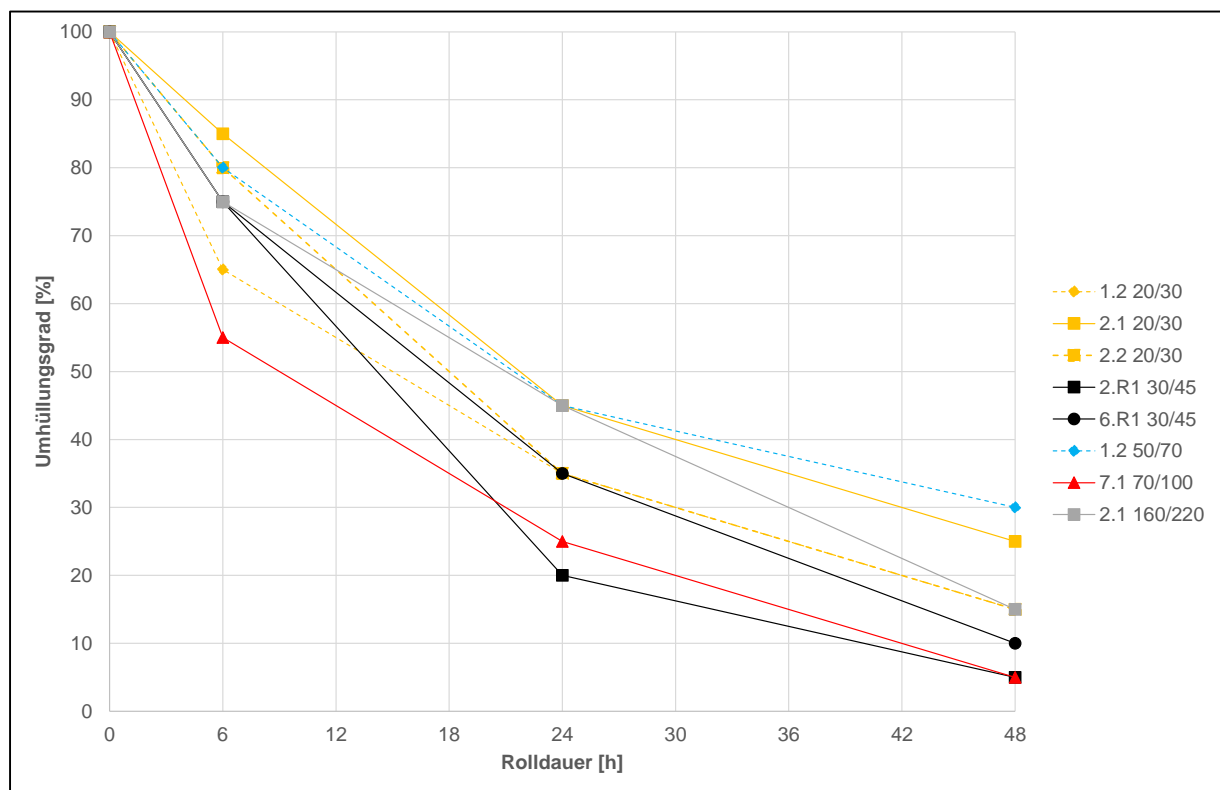


Bild 5-11: Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Rhyolith

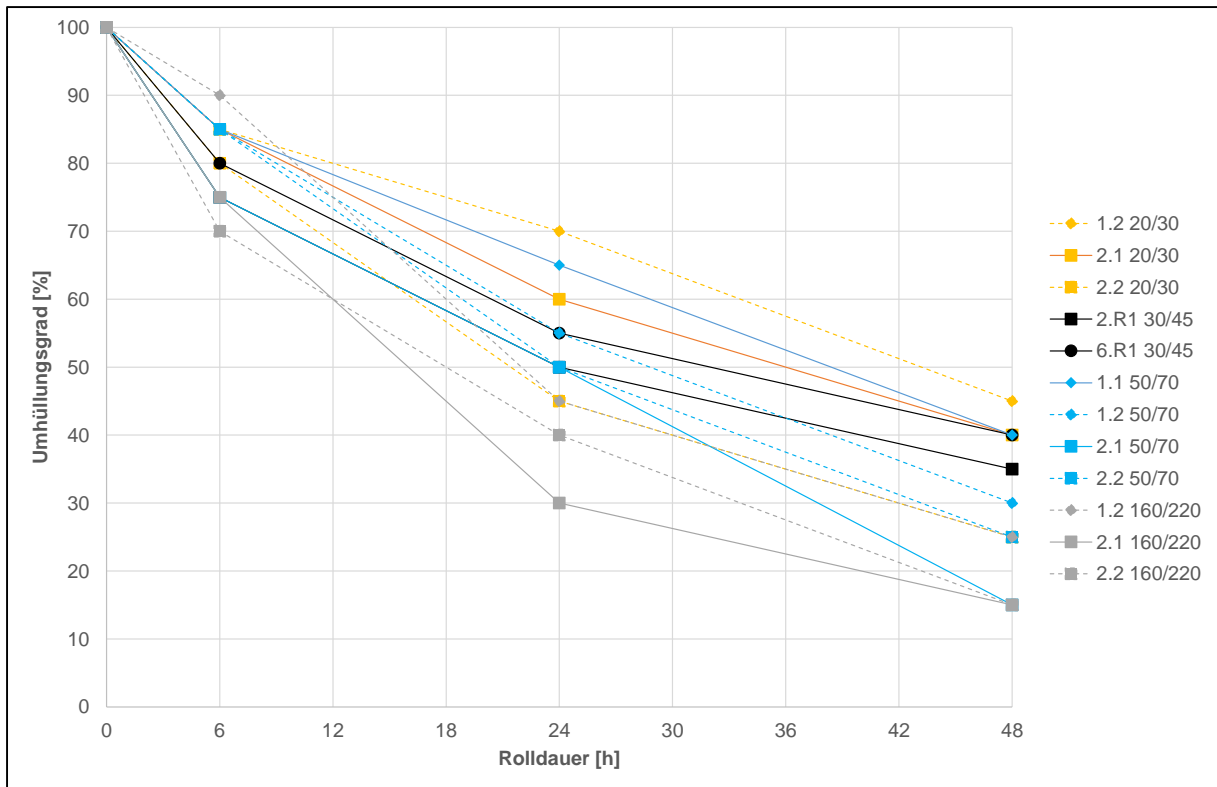


Bild 5-12: Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Diabas

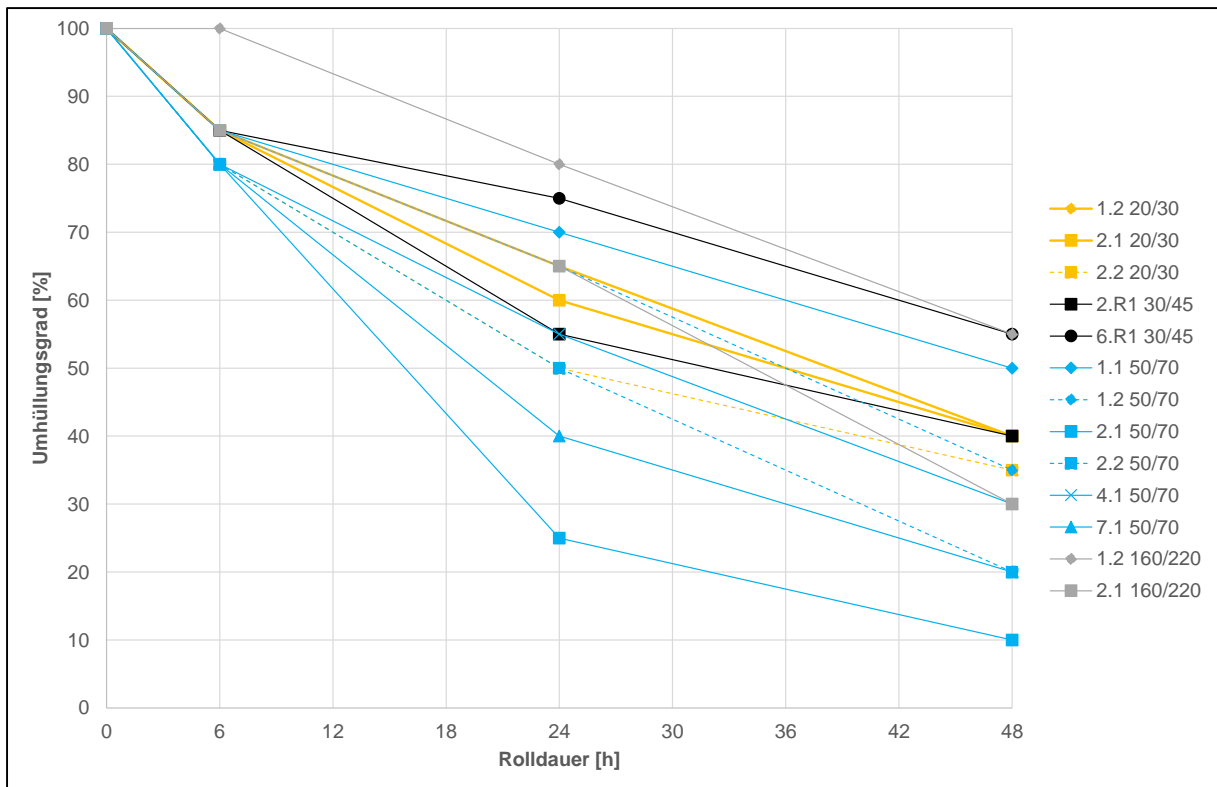


Bild 5-13: Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Grauwacke

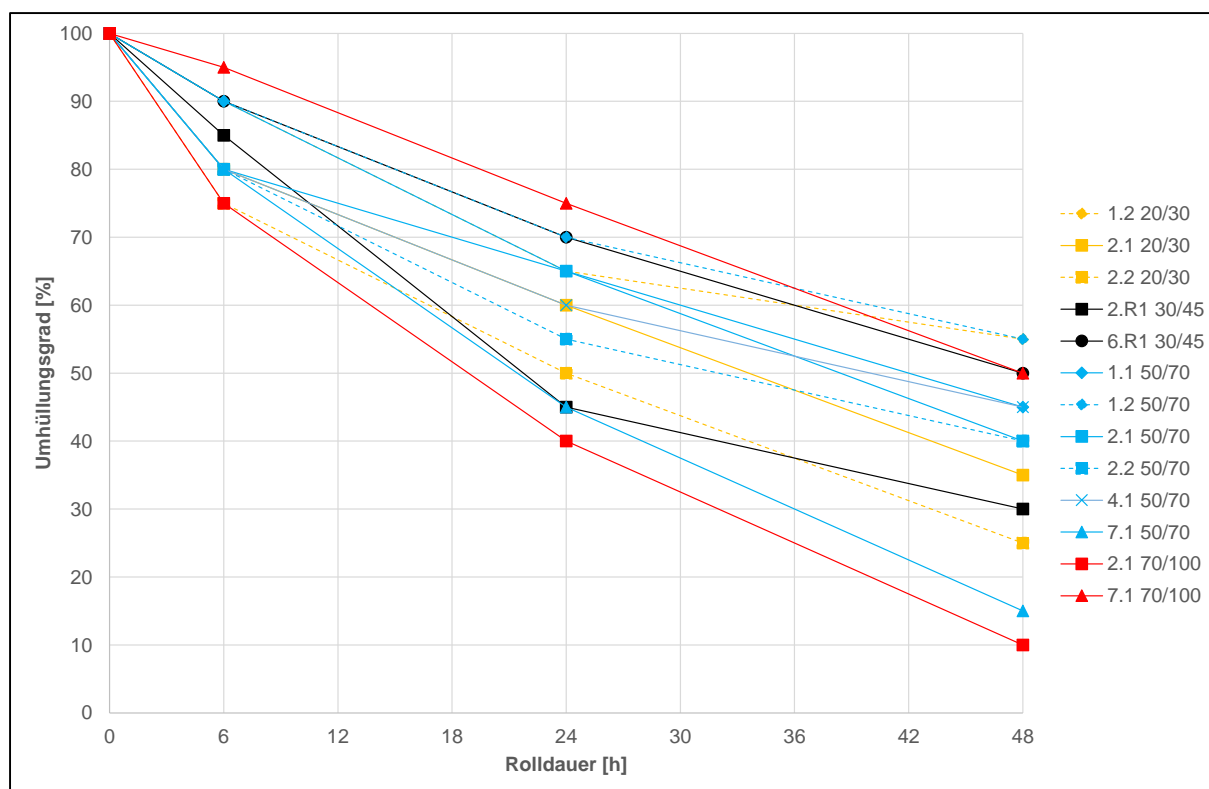


Bild 5-14: Ergebnisse Rolling-Bottle-Test Basalt

In Tab. 5-6 sind die Ergebnisse des Rolling-Bottle-Tests der polymermodifizierten Bitumen zusammengefasst.

Tab. 5-6: Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Rhyolith, Diabas, Grauwacke und Basalt mit den Polymermodifizierten Bitumen

Bitumen	Umhüllungsgrad [%]											
	Rhyolith			Diabas			Grauwacke			Basalt		
	6 h	24 h	48 h	6 h	24 h	48 h	6 h	24 h	48 h	6 h	24 h	48 h
2.1 50/70 + Elastomer A	40	5	5	75	60	50	90	85	65	90	85	50
2.1 50/70 + Elastomer B	80	20	5	90	70	35	85	70	60	90	60	50
2.1 50/70 + Elastomer C	65	5	5	95	40	25	90	75	65	95	80	60
2.1 50/70 + Plastomer A	45	5	0	90	35	20	85	30	25	90	40	35
2.1 50/70 + Plastomer B	75	40	25	85	45	30	85	75	45	90	85	50
2.1 50/70 + Plastomer C	85	45	35	85	45	30	85	60	40	90	75	60

5.3.3 Schüttelabriebversuch

Die Mittelwerte des Schüttelabriebversuchs der verschiedenen Gesteine und Bitumen sind Tab. 5-7 zu entnehmen. Da die Zusammensetzung der Probekörper deutlich von der Norm abweicht und sehr hohlraumreich ist, kam es innerhalb einer Variante zu größeren Streuungen zwischen den einzelnen Versuchsergebnissen als nach [DIN EN

12274-7, 2005] zulässig. Die Ausreißergrenze wurde auf eine maximal zulässige Standardabweichung von 4 % festgelegt.

Tab. 5-7: Ergebnisse des Schüttelabriebversuchs mit Rhyolith, Diabas, Grauwacke und Basalt

Bitumen	Abrieb [%]			
	Rhyolith	Diabas	Grauwacke	Basalt
2.1 20/30	64,1	62,6	78,0	75,0
2.2 20/30	58,7	49,8	58,9	65,7
2.R1 30/45	52,3	50,5	52,3	61,3
6.R1 30/45	39,8	34,1	39,1	43,7
1.1 50/70	42,6	42,4	47,9	48,0
1.2 50/70	41,0	48,8	41,0	45,6
2.1 50/70	44,8	46,5	43,9	44,8
2.2 50/70	38,5	35,8	33,2	31,2
2.1 70/100	21,3	20,1	21,1	10,9
5.1 70/100	14,3	21,3	23,0	25,0
1.2 160/220	7,8	5,6	7,8	1,3
2.1 160/220	9,2	8,2	15,7	2,8
2.2 160/220	10,1	5,5	9,5	10,8

In Tab. 5-8 sind die Ergebnisse des Schüttelabriebversuchs für die Polymermodifizierten Bitumen zusammengefasst.

Tab. 5-8: Ergebnisse des Schüttelabriebversuchs der Polymermodifizierten Bitumen mit Rhyolith, Diabas, Grauwacke und Basalt

Bitumen	Abrieb [%]			
	Rhyolith	Diabas	Grauwacke	Basalt
2.1 50/70 + Elastomer A	27,6	32,6	39,1	55,6
2.1 50/70 + Elastomer B	37,2	35,3	34,1	38,1
2.1 50/70 + Elastomer C	38,5	28,3	33,2	42,2
2.1 50/70 + Plastomer A	35,9	27,0	37,6	24,3
2.1 50/70 + Plastomer B	23,3	26,8	22,4	17,1
2.1 50/70 + Plastomer C	17,2	25,1	25,3	19,0

5.3.3 Bestimmung der Wasserempfindlichkeit

Die Wasserempfindlichkeit wurde entsprechend [TP Asphalt StB 07, Teil 12] bei 15 °C an Marshall-Probekörpern (MPK) bestimmt. Die Zusammensetzungen der Marshall-Probekörper in Abhängigkeit von der Gesteinsart sind in Tab. 5-9 zusammengefasst.

Tab. 5-9: Mischgutzusammensetzung und -eigenschaften der Probekörper für die Bestimmung der Wasserempfindlichkeit

Mischgutzusammensetzung und -eigenschaften	Einheit	Rhyolith	Basalt
Zusammensetzung der Gesteinskörnungen			
Anteil Feine Gesteinskörnung 0/2 mm	[M.-%]	11	12
Anteil Grobe Gesteinskörnung 2/5 mm	[M.-%]	4	4
Anteil Grobe Gesteinskörnung 5/8 mm	[M.-%]	85	84
Rohdichte Gesteinsgemisch	[g/cm ³]	2,647	2,965
Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)			
11,2 mm	[M.-%]	100,0	100,0
8,0 mm	[M.-%]	93,0	94,9
5,6 mm	[M.-%]	26,7	27,7
2,0 mm	[M.-%]	10,6	11,8
0,125 mm	[M.-%]	1,8	1,5
0,063 mm	[M.-%]	1,0	1,0
Bindemittelanteil und -eigenschaften			
Bindemittelgehalt B	[M.-%]	7,5	6,7
Mischguteigenschaften			
Raumdichte $\rho_{b \text{ gemessen}}$	[g/cm ³]	1,924	2,136
Raumdichte $\rho_{b \text{ SSD}}$	[g/cm ³]	2,141	2,370
Rohdichte ρ_m	[g/cm ³]	2,364	2,629
Hohlraumgehalt basierend auf gemessener Raumdichte	[Vol.-%]	18,6	18,8
Hohlraumgehalt basierend auf Raumdichte SSD	[Vol.-%]	9,4	9,9

In Tab. 5-10 sind die Ergebnisse für den Verhältniswert ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) der statischen Spaltzugfestigkeit (indirekte Zugfestigkeit) von wassergelagerten und trockenen Probekörpern aufgeführt, die mit Hilfe des statischen Spaltzugversuches bei einer Temperatur von 15 °C bestimmt wurden. ITSR ist der Verhältniswert der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung zu der Spaltzugfestigkeit vor Wasserlagerung. Hierbei handelt es sich um die Mittelwerte einer 3-fach Bestimmung. Als Ausreißer wurden gemäß [TP Asphalt StB 07, Teil 23] Messungen mit Abweichungen größer als 17 % vom Mittelwert deklariert.

Tab. 5-10: Ergebnisse der statischen Spaltzugversuche bei T = 15 °C mit Basalt und Rhyolith

Gestein	Bitumen	ITS _{trocken} [kPa]	ITS _{nass} [kPa]	ITSR [%]
Basalt	1.4 20/30	1.452	1.414	97
	2.1 20/30	1.651	1.663	101
	2.2 20/30	1.567	1.575	100
	1.2 30/45	1.612	1.585	98
	6.R1 30/45	926	1068	115
	1.1 50/70	1.130	1.135	100
	1.2 50/70	1.200	1.250	104
	2.1 50/70	1.182	1.473	125
	2.2 50/70	1.192	1.080	91
	2.1 70/100	715	913	128
	5.1 70/100	963	1.001	104
	7.4 70/100	1.061	1.156	109
	Rhyolith	1.4 20/30	1.408	1.553
2.1 20/30		1.523	1.509	99
2.2 20/30		1.364	1.111	81
1.2 30/45		1.510	1.276	85
2.R1 30/45		1.155	1.064	92
6.R1 30/45		1.065	1.001	94
1.1 50/70		1.213	1.234	102
1.2 50/70		1.421	1.343	95
2.1 50/70		1.231	1.310	106
2.2 50/70		1.034	836	81
2.1 70/100		953	893	94
5.1 70/100		892	507	57
7.4 70/100		1.173	1.116	95

Mit dem dynamischen Spaltzug-Schwellversuch wurde das Ermüdungsverhalten bei mittlerer Belastung untersucht und die Ermüdungslastwechselzahl (N_{makro}) bei mittlerer Belastung bei einer Temperatur von 15 °C vor und nach Wasserlagerung bestimmt. Dabei wurde die gleiche Mischgutzusammensetzung gewählt wie bei den statischen Versuchen. Die Ergebnisse sowie der Verhältniswert von Nass zu Trocken sind in Tab. 5-11 zusammengefasst.

Tab. 5-11: Ergebnisse der dynamischen Spaltzug-Schwellversuche bei T = 15 °C bei mittlerer Belastung mit Basalt und Rhyolith

Gestein	Bitumen	N _{makro Nass} [-]	N _{makro Trocken} [-]	Verhältnis N _{makro Nass} / N _{makro Trocken} [%]
Rhyolith	2.1 20/30	3.718	2.058	181
	2.2 20/30	3.386	4.715	72
	1.4 20/30	6.789	3.220	211
	2.R1 30/45	3.553	4.549	78
	1.2 30/45	2.557	5.047	51
	6.R1 30/45	9.031	6.209	145
	1.1 50/70	1.560	2.224	70
	1.2 50/70	1.893	2.887	66
	2.1 50/70	2.556	2.723	94
	2.2 50/70	4.051	2.557	158
	2.1 70/100	2.557	2.390	107
	5.1 70/100	1.560	1.394	112
	7.4 70/100	814	1.063	77
Basalt	2.1 20/30	4.880	3.718	131
	2.2 20/30	6.292	4.548	138
	1.4 20/30	5.213	3.884	134
	1.2 30/45	3.718	2.724	137
	6.R1 30/45	5.378	3.387	159
	1.1 50/70	5.212	3.054	171
	1.2 50/70	2.307	1.809	128
	2.1 50/70	1.867	966	193
	2.2 50/70	3.553	1.516	234
	2.1 70/100	3.386	1.394	243
	5.1 70/100	2.058	2.310	89
	7.4 70/100	1.727	2.059	84

5.3.4 Kontaktwinkelmessungen

In Tab. 5-12 sind die Ergebnisse der Oberflächenspannung der Gesteine, die mit der Methode des „liegenden Tropfens“ (sessile-drop-method) bestimmt wurden, zusammengefasst. Neben der Oberflächenspannung wurden die dispersen und polaren Anteile bestimmt. Beim Diabas war eine Bestimmung der Oberflächenspannung nicht möglich.

Tab. 5-12: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen der Gesteine

	Einheit	Basalt						
		Einzelergebnisse					Mittelwert	Median
Oberflächenspannung	[mN/m]	62,49	48,66	58,51	55,38	45,91	54,19	55,38
Disperse Anteile		39,50	29,99	35,36	37,16	29,35	34,27	35,36
Polare Anteile		22,99	18,67	23,16	18,22	16,57	19,92	18,67
		Grauwacke						
Oberflächenspannung	[mN/m]	54,00	54,16	48,08	55,27	51,76	52,65	54,16
Disperse Anteile		38,93	34,56	36,70	40,11	39,19	37,90	38,93
Polare Anteile		15,07	19,60	11,38	15,16	12,57	14,76	15,07
		Rhyolith						
Oberflächenspannung	[mN/m]	56,42	64,00	55,38	62,40	64,90	60,62	62,40
Disperse Anteile		38,61	41,68	37,16	41,75	41,75	40,19	41,68
Polare Anteile		17,81	22,32	18,22	20,65	23,15	20,43	20,65

Für die Auswertung wird der Median herangezogen, da beim Mittelwert Ausreißer zu stark berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Oberflächenspannung der ausgewählten Bitumen sind Tab. 5-13 zu entnehmen. Hier wurde die Methode des „hängenden Tropfens“ (pendant-drop-method) verwendet.

Tab. 5-13: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen der Bitumen

Bitumen	Oberflächenspannung [mN/m]					
	Einzelwerte					Mittelwert
1.2 20/30	30,27	30,34	30,36	30,31	30,32	30,32
2.1 20/30	30,44	30,40	30,34	30,50	30,44	30,42
2.R1 30/45	30,51	30,48	30,55	30,61	30,45	30,52
6.R1 30/45	30,11	30,18	30,26	30,21	30,22	30,20
1.1 50/70	30,54	30,56	30,54	30,57	30,57	30,56
1.2 50/70	31,07	31,12	31,08	31,11	31,07	31,09
2.1 50/70	31,43	31,40	31,36	31,44	31,42	31,41
2.2 50/70	30,89	30,96	30,98	31,00	30,97	30,96
5.1 70/100	31,56	31,59	31,88	31,67	31,63	31,67
7.1 70/100	31,55	31,50	31,56	31,57	31,57	31,55
1.2 160/220	32,38	32,27	32,27	32,25	32,15	32,26
2.1 160/220	31,84	31,90	31,88	31,71	31,73	31,81
2.2 160/220	31,87	31,86	31,80	31,85	31,85	31,85

In Tab. 5-14 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zum Spreitverhalten der ausgewählten Bitumen bei Basalt und Rhyolith. Dabei wurde die Zeitspanne bestimmt, in der sich der Kontaktwinkel von 60° auf 30° verringert.

Tab. 5-14: Spreitverhalten der ausgewählten Bitumen bei Basalt und Rhyolith

Gestein	Bitumen	Zeit für die Verringerung des Winkels von 60° auf 30° [s]
Basalt	1.1 50/70	52
	1.2 50/70	49
	2.1 50/70	85
	2.2 50/70	54
	5.1 70/100	62
	7.1 70/100	90
	1.2 160/220	59
	2.1 160/220	98
	2.2 160/220	84
Grauwacke	1.1 50/70	58
	1.2 50/70	62
	2.1 50/70	51
	2.2 50/70	80
	5.1 70/100	34
	7.1 70/100	72
	1.2 160/220	60
	2.1 160/220	96
	2.2 160/220	86
Rhyolith	1.1 50/70	54
	1.2 50/70	63
	2.1 50/70	63
	2.2 50/70	62
	5.1 70/100	107
	7.1 70/100	76
	1.2 160/220	46
	2.1 160/220	81
	2.2 160/220	58

6 Bewertung der Versuchsergebnisse

6.1 Bitumen

6.1.1 Zusammenhänge zwischen den physikalischen Kennwerten

Die rheologischen Untersuchungen mittels DSR zeigen eine deutliche Abhängigkeit des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels von der Temperatur und der Bitumensorte (siehe Bild 5-5 und Bild 5-6). Bei einer Erwärmung ist bei allen Straßenbaubitumen eine ähnlich ausgeprägte, stetig abnehmende Steifigkeit und Elastizität festzustellen. Bitumen weicherer Sorten weisen einen klaren Trend zu niedrigeren Schermoduln und höheren Phasenwinkeln auf als Bitumen härterer Sorten. Die Streuungen der Messwerte von Bitumen gleicher Sorte sind vor allem bei dem Phasenwinkel groß. So weisen beispielsweise einige Bitumen 70/100 trotz deutlich höherer komplexer Schermoduln im mittleren Temperaturbereich höhere Phasenwinkel als der Durchschnitt der Bitumen 160/220 auf.

Neben den rheologischen Untersuchungen mit dem DSR, deren minimale Messtemperatur -10 °C betrug, wurden gezielte Analysen zum Kälteverhalten durch die Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß sowie der Biegekriechsteifigkeit und des m-Wertes durchgeführt. Die Bestimmung der beiden letztgenannten Parameter mittels BBR erfolgte bei -16 °C .

Zwischen den beiden Kennwerten der BBR-Messung besteht bei den untersuchten, nicht modifizierten Straßenbaubitumen ein direkter Zusammenhang: mit zunehmendem m-Wert nimmt die Biegekriechsteifigkeit in logarithmischem Maßstab ab (Bild 5-4). Die entsprechend [DIN EN 14771, 2012] ermittelten Messwerte nach einer Belastungsdauer von 60 s korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9467. Somit nimmt bei Straßenbaubitumen das Relaxationsvermögen mit zunehmender Steifigkeit proportional ab.

Die mittels BBR bestimmten rheologischen Kennwerte stimmen mit hoher Präzision mit den bei niedrigen Temperaturen im DSR gemessenen Kennwerten überein. Das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen der Biegekriechsteifigkeit bei -16 °C (BBR) und dem komplexen Schermodul bei 0 bzw. -10 °C (DSR) ist mit 0,94 bzw. 0,91 sehr hoch (Bild 6-1), da die in Beziehung gesetzten Größen zwar prüftechnische Unterschiede aufweisen, aber jeweils Kennwerte für die Steifigkeit darstellen.

Die Bestimmtheitsmaße zwischen dem m-Wert bei -16 °C (BBR) und dem Phasenwinkel bei 0 bzw. -10 °C (DSR) sind mit 0,94 bzw. 0,92 ebenfalls sehr hoch (Bild 6-2). Ein hohes Relaxationsvermögen wird folglich im BBR durch einen langsamen Abbau der Biegekriechsteifigkeit (niedriger m-Wert) und im DSR durch einen geringen viskosen Verformungsanteil (niedriger Phasenwinkel) gekennzeichnet. Straßenbaubitumen mit einem geringen Relaxationsvermögen bauen die Spannungen unter statischer Belastung (BBR) dagegen nur langsam ab und verhalten sich bei dynamischer Belastung (DSR) weitestgehend elastisch.

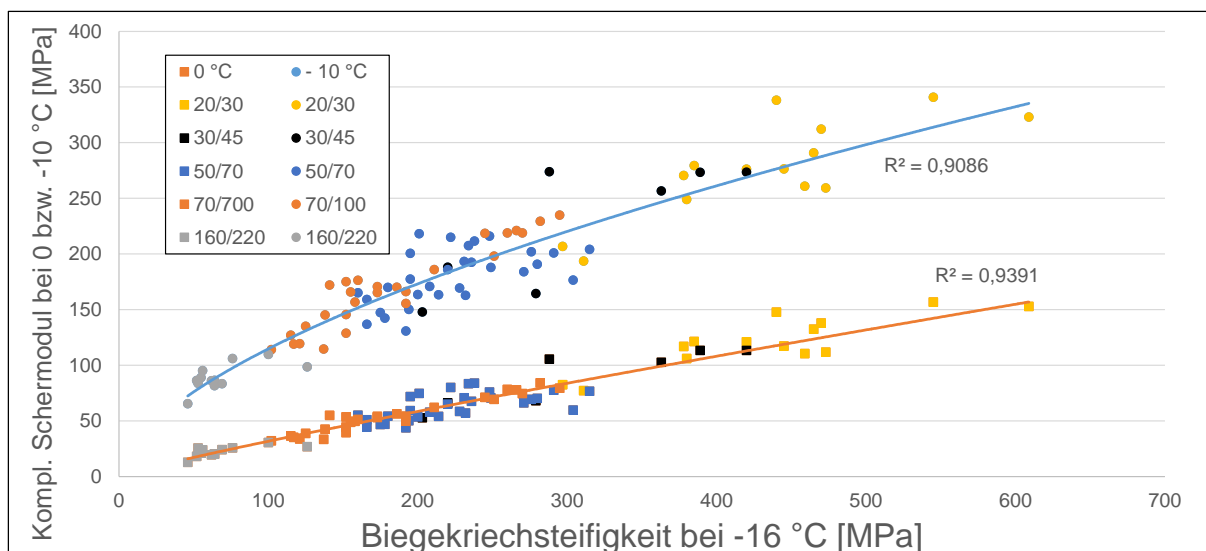


Bild 6-1: Komplexer Schermodul bei 0 bzw. -10 °C in Abhängigkeit von der Biegekiechsteifigkeit bei -16 °C

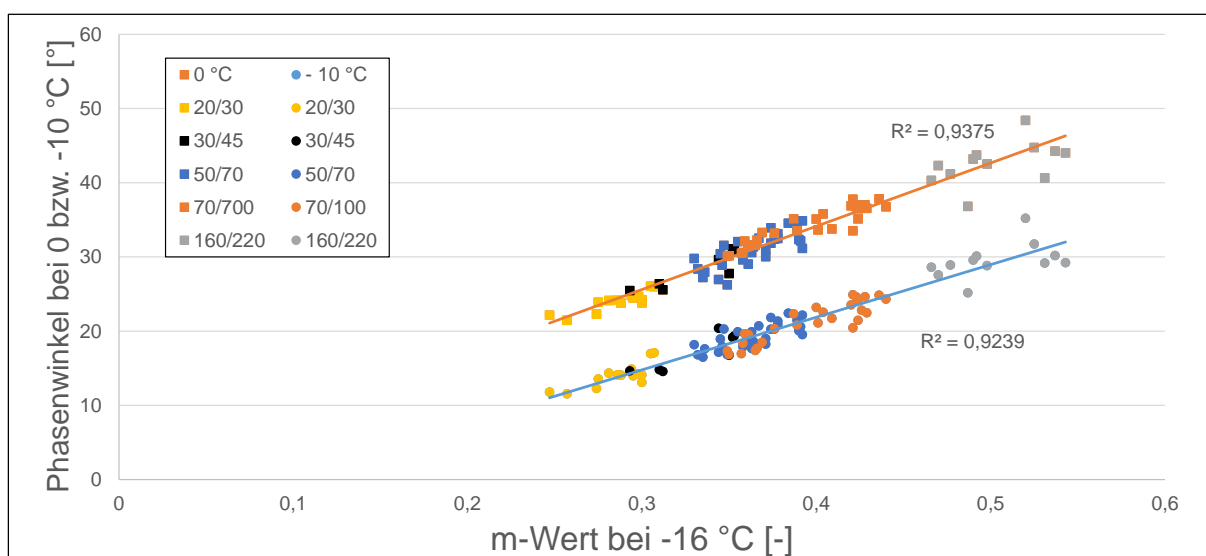


Bild 6-2: Phasenwinkel bei 0 bzw. -10 °C in Abhängigkeit von dem m-Wert bei -16 °C

Während die Bewertung des Kälteverhaltens von Straßenbaubitumen mittels BBR und DSR nahezu identisch ausfällt, bestehen zur klassischen Charakterisierung durch den Brechpunkt nach Fraaß deutliche Unterschiede. Dabei wird die generelle Tendenz, dass weichere Bitumensorten ein besseres Kälteverhalten aufweisen als härtere, zwar auch anhand des Brechpunktes bestätigt (mit steigendem Brechpunkt nimmt die Biegekiechsteifigkeit zu und der m-Wert ab, siehe Bild 6-3). Mit Bestimmtheitsmaßen von 0,63 zwischen dem Brechpunkt und der Biegekiechsteifigkeit bei -16 °C bzw. 0,62 zwischen dem Brechpunkt und dem m-Wert bei -16 °C liefern die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden jedoch im Detail deutlich abweichende Ergebnisse. Dass diese unterschiedliche Beurteilung nicht primär durch die abweichenden Temperaturen verursacht wird, geht aus der rechnerischen Bestimmung der komplexen Schermoduln bei der Temperatur des Brechpunktes hervor. Die aus den komplexen Schermoduln bei 0 und -10 °C inter- bzw. extrapolierten Steifigkeiten bei der Temperatur des Brechpunktes weisen bei einem Mittelwert von 245 MPa eine Standardabweichung von 109 MPa auf.

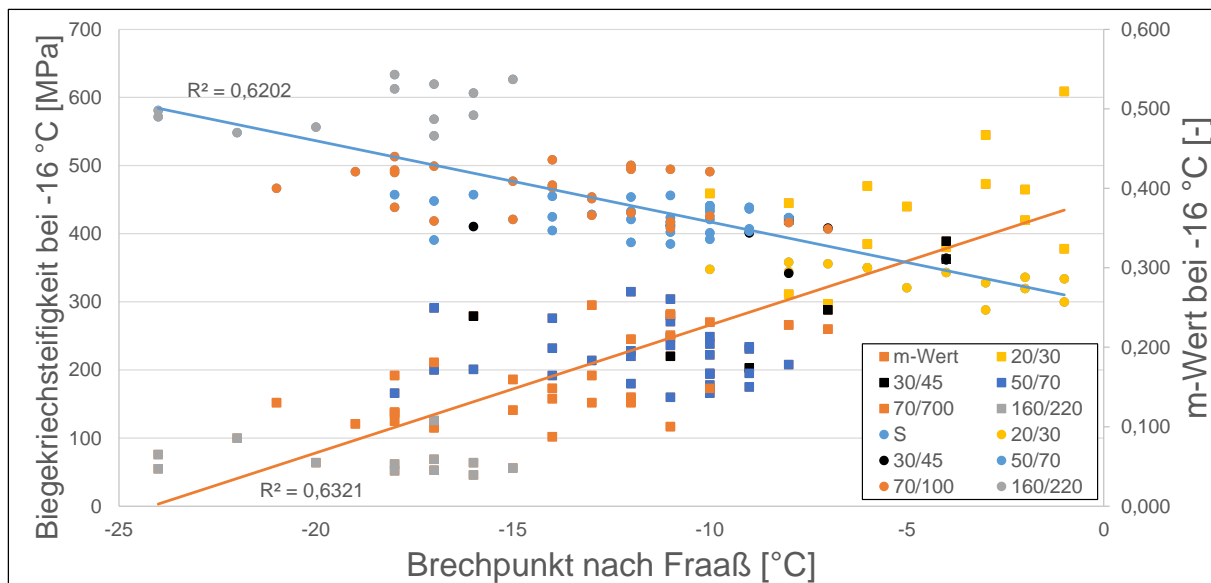


Bild 6-3: Biegekriechsteifigkeit und m-Wert jeweils bei -16 °C in Abhängigkeit vom Brechpunkt nach Fraaß

Im Gebrauchstemperaturbereich wurden an den Bitumen die Nadelpenetration, die Kraftduktivität sowie der komplexe Schermodul und der Phasenwinkel bestimmt. Die Ergebnisse der DSR-Untersuchungen, die bei 20 und 30 °C durchgeführt wurden, wurden auf die Temperatur der Nadelpenetration (25 °C) interpoliert. Die Phasenwinkel wurden hierzu linear und die komplexen Schermoduln aufgrund deren exponentieller Abhängigkeit von der Temperatur logarithmisch interpoliert. Da die Kraftduktivität entsprechend der Bitumenhärte bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurde, werden die Ergebnisse ausschließlich zur Charakterisierung der Polymermodifizierungen in Kapitel 6.1.2 berücksichtigt.

Die Eindringtiefe ist ebenso wie der komplexe Schermodul ein Maß für die Bitumensteifigkeit. Bei einer Gegenüberstellung dieser Kennwerte im logarithmischen Maßstab besteht mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,93 von kleineren Abweichungen abgesehen ein präziser Zusammenhang (Bild 6-4). Im Vergleich zu der Nadelpenetration ist jedoch bei sehr harten Bitumen, deren Eindringtiefen nur geringfügige Unterschiede aufweisen, anhand des komplexen Schermoduls eine bessere Differenzierung möglich. Zwischen dem Phasenwinkel und der Nadelpenetration besteht mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,81 eine schwächere Korrelation, die prinzipiell darauf beruht, dass Straßenbaubitumen mit zunehmender Steifigkeit höhere elastische Verformungsanteile aufweisen. Vor allem bei modifizierten Bitumen liefert der Phasenwinkel jedoch Informationen über die Bitumeneigenschaften im Gebrauchstemperaturbereich, die durch die Nadelpenetration nicht analysiert werden.

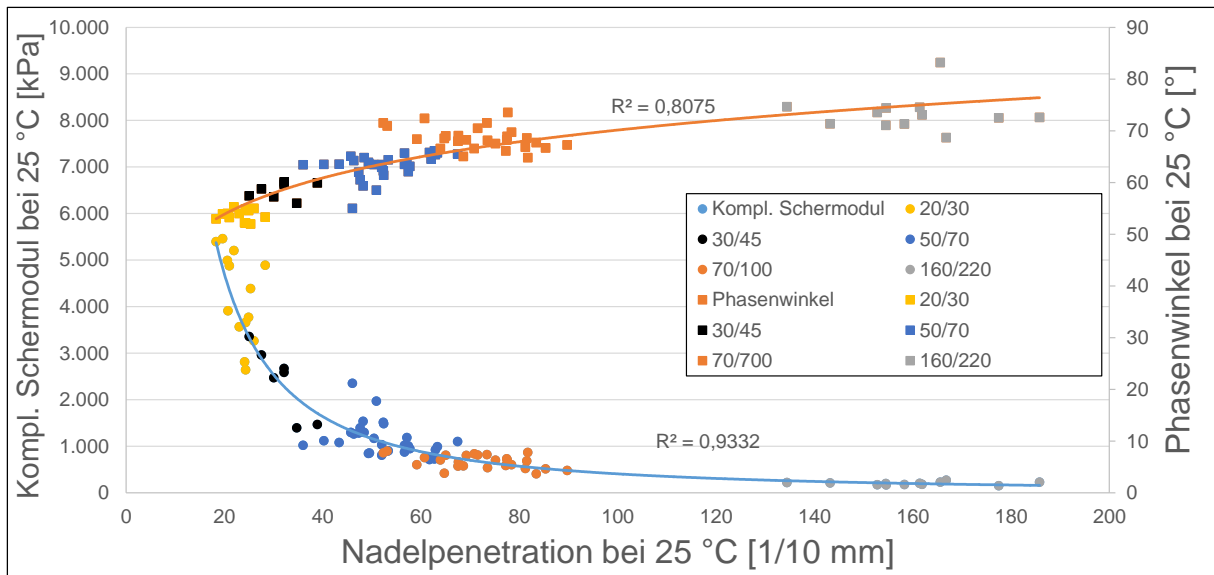


Bild 6-4: Korrelation zwischen Nadelpenetration und dem komplexen Schermodul bzw. dem Phasenwinkel jeweils bei 25 °C

Oberhalb des Gebrauchstemperaturbereichs wurden die Erweichungspunkte Ring und Kugel und, mittels DSR, die rheologischen Größen komplexer Schermodul und Phasenwinkel bestimmt. Die Straßenbaubitumen weisen im Temperaturbereich des Erweichungspunktes Ring und Kugel mit Phasenwinkeln von etwa 80 ° vorwiegend viskose und nur noch geringe elastische Verformungsanteile auf. Den daraus folgenden unmittelbaren Zusammenhang zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Bitumensteifigkeit verdeutlicht Bild 6-5: die durch logarithmische Interpolation berechneten komplexen Schermoduln der untersuchten Straßenbaubitumen stimmen bei der Temperatur des jeweiligen Erweichungspunktes Ring und Kugel weitestgehend überein. Die vorhandene Streuung um den Mittelwert von 14,85 kPa ist angesichts der Tatsache, dass die komplexen Schermoduln in exponentiellen Zusammenhang zu der Temperatur stehen, sehr gering. Lediglich ein leichter Rückgang der komplexen Schermoduln mit abnehmender Bitumenhärte ist festzustellen.

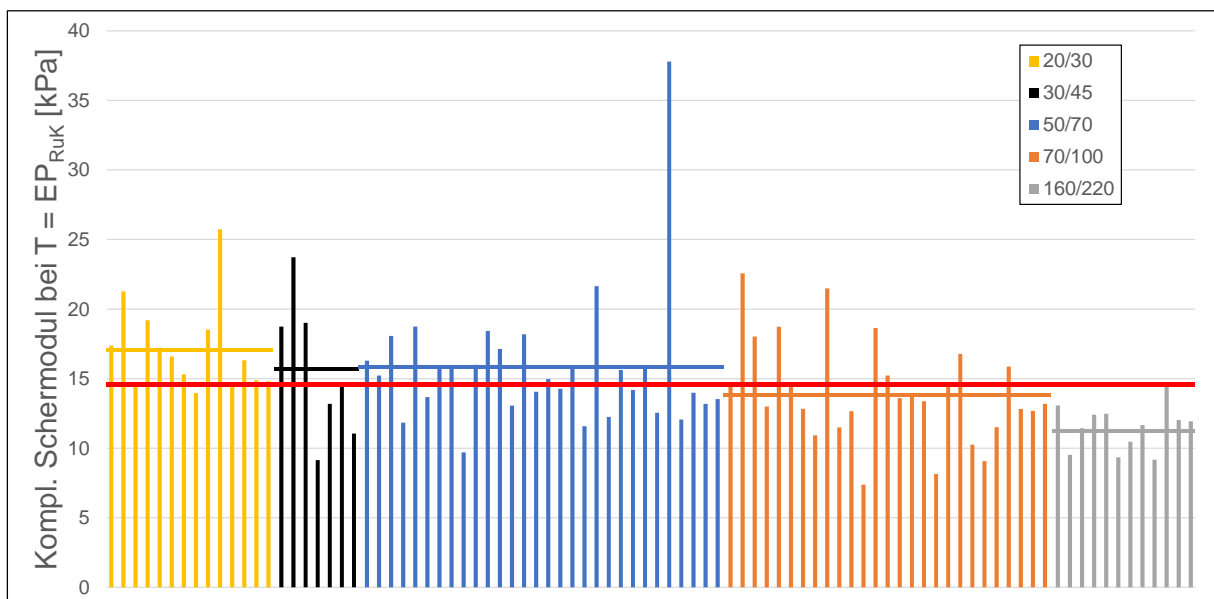


Bild 6-5: Komplexe Schermoduln bei der Temperatur des Erweichungspunktes Ring und Kugel

Das Bild 6-6 veranschaulicht die deutlichen Zusammenhänge zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und dem komplexen Schermodul im gleichen Temperaturbereich. Die Gegenüberstellung des Erweichungspunktes Ring und Kugel und der Temperatur, bei der der komplexe Schermodul den Wert 15 kPa aufweist (vergleichbar mit einer Äquiviskositätstemperatur) führt bei den untersuchten Straßenbaubitumen zu einem Bestimmtheitsmaß von 0,94. Im Mittel weichen die beiden ermittelten Temperaturen bei den untersuchten Straßenbaubitumen lediglich um 1,3 °C voneinander ab, während unterschiedliche Modifizierungen zu charakteristischen Abweichungen führen können (siehe Kapitel 6.1.2).

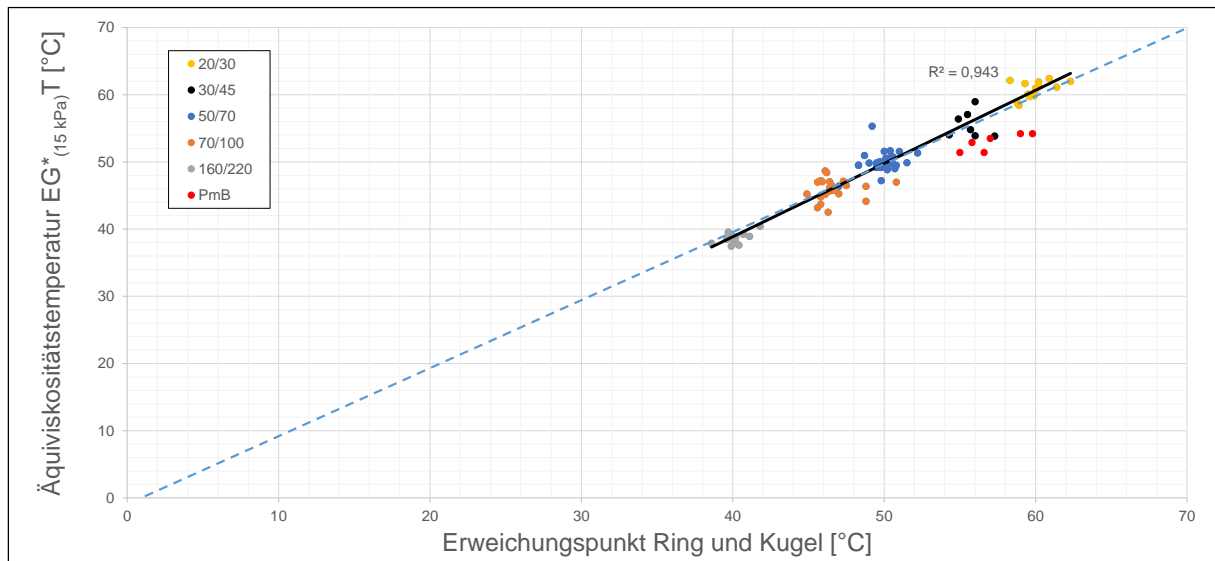


Bild 6-6: Korrelation zwischen Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Äquiviskositätstemperatur (= Temperatur, bei der der komplexe Schermodul 15 kPa beträgt)

Generell ist die Bewertung der einzelnen Straßenbaubitumen über alle Temperaturbereiche konstant. Dies verdeutlicht die ungewöhnliche Gegenüberstellung der etwa bei Verarbeitungstemperatur gemessenen komplexen Viskosität, die bei reinviskosem Straßenbaubitumen (je nach Bitumenhärte etwa ab einer Temperatur von 60 °C) betragsmäßig der dynamischen Viskosität entspricht, mit dem Gebrauchstemperatur- und dem Kälteverhalten. Die Zusammenhänge zwischen der komplexen Viskosität bei 120 °C und dem komplexen Schermodul bei 25 °C bzw. der Biegekekriecheifigkeit bei -16 °C zeigen mit Bestimmtheitsmaßen von 0,85 bzw. 0,66 direkte Zusammenhänge zwischen den Steifigkeiten bei den unterschiedlichen Temperaturen auf (Bild 6-7). Mit Plastizitätsspannen von 56,1 bis 73,3 °C bestehen zwischen den Bitumen jedoch deutliche Differenzen bezüglich der Temperaturabhängigkeit (Bild 6-8). Mit durchschnittlich 58,9 °C weisen hierbei die weichen Bitumen 160/220 deutlich geringere Plastizitätsspannen auf als die mittelharten 50/70 (im Mittel 61,6 °C) oder gar die harten 20/30 mit gemittelten 64,7 °C, da offensichtlich der versteifende Einfluss auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel stärker ist als der versprödende Einfluss auf den Brechpunkt nach Fraaß.

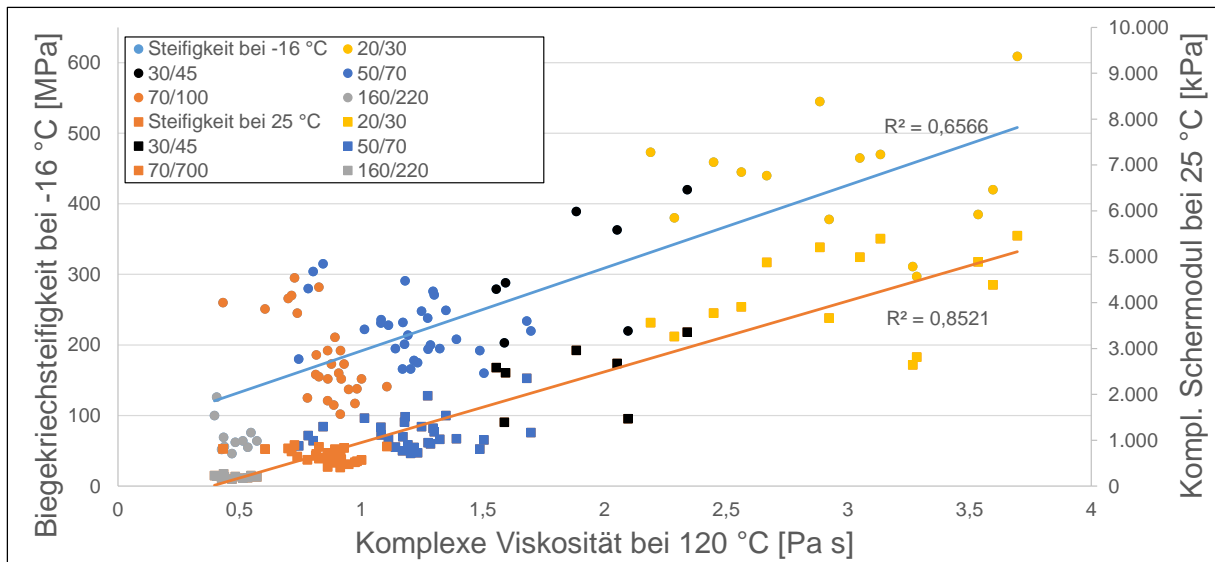


Bild 6-7: Abhängigkeit zwischen der komplexen Viskosität bei 120 °C und der Biegekrechsteifigkeit bei -16 °C bzw. dem komplexen Schermodul bei 25 °C

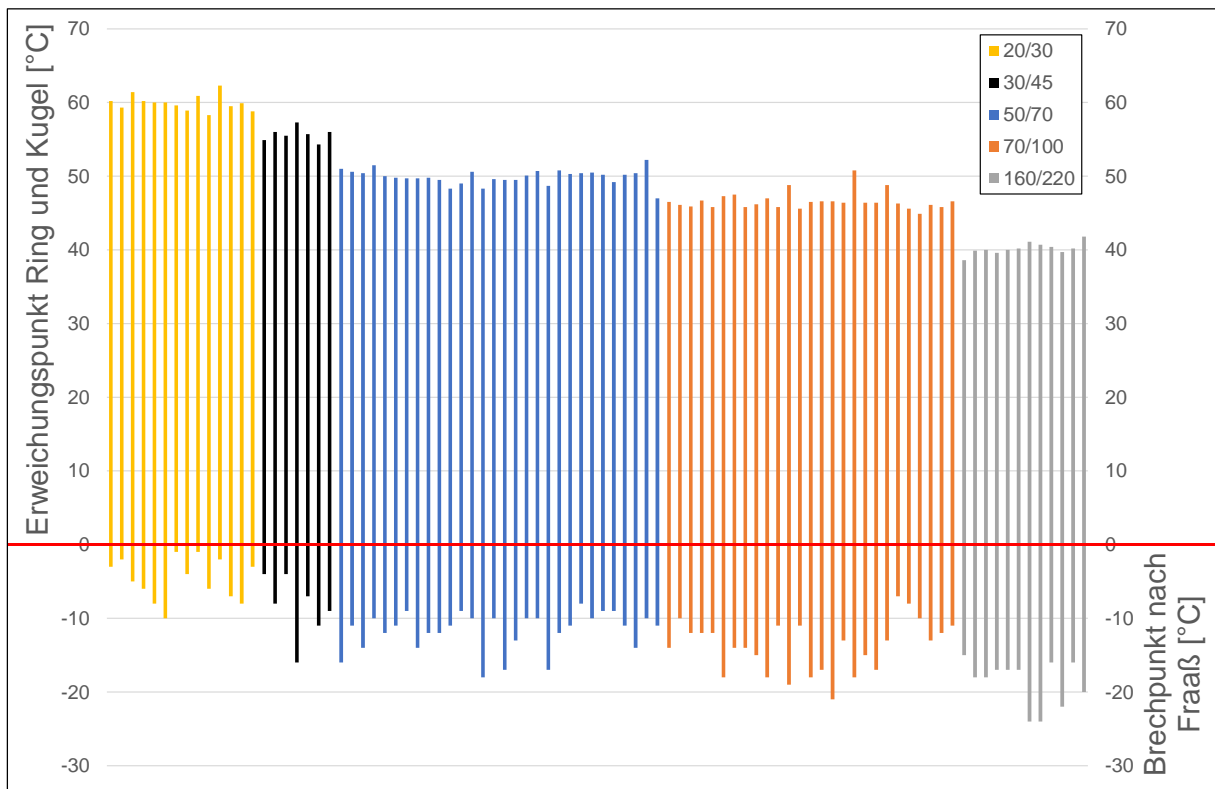


Bild 6-8: Plastizitätsspanne (Erweichungspunkt und Brechpunkt nach Fraaß) der untersuchten Straßenbaubitumen

6.1.2 Einfluss der verwendeten Polymere auf die Eigenschaften der untersuchten Bitumen

Das Bitumen 2.1 50/70, das aufgrund des hohen Anteils an Aromaten und dem damit verbundenen niedrigen GAESTEL-Index zur Modifizierung mit Polymeren theoretisch gut geeignet ist (siehe Kapitel 3.1.3), wies bei der gewählten geringen Dosierung der Polymere augenscheinlich keine relevanten Probleme bei der Modifizierung auf. Da die einzelnen Messungen zudem nur geringe Streuungen aufwiesen, liegen offensichtlich homogene Mischungen vor.

Das spröde Verhalten des Bitumen 2.1 50/70 führte im Kraftduktilitätsversuch bei niedrigen Temperaturen bereits bei relativ geringen Dehnungen zum Reißen des Bitumens. Erst bei einer Prüftemperatur von 15 °C war ein ausreichend duktiler Verhalten vorhanden, so dass eine aussagekräftige Auswertung der Kraft-Dehnungs-Kurve (Bild 6-9) möglich war. Die modifizierten Bitumen wurden zu Vergleichszwecken ebenfalls bei 15 °C untersucht. Eine quantitative Bewertung der Formänderungsarbeit, die nach den [TL Bitumen-StB, 2013] bei Polymermodifizierten Bitumen dieser Härte bei 5 °C anzugeben ist, ist folglich nicht möglich. Qualitativ sind aus den Funktionsverläufen in Bild 6-9 jedoch charakteristische Unterschiede abzulesen.

Das Plastomer A bewirkt eine Versteifung des Bitumens, wodurch das Kraftmaximum im Bereich geringer Dehnungen um 115 % ansteigt. Nach Überschreiten des Kraftmaximums lässt die Wirkung der Polymere jedoch kontinuierlich nach. Die Plastomere B und C, deren Kraft-Dehnungs-Kurven nahezu identisch verlaufen, versteifen das Bitumen bei geringen Dehnungen nur leicht. Im Gegensatz zu Plastomer A bilden die beiden anderen Plastomere bei zunehmender Dehnung jedoch offensichtlich ein stabiles Netzwerk aus. Hierdurch nimmt die zur Verformung notwendige Kraft trotz zunehmender Streckung und damit verbundenem abnehmendem Bitumenquerschnitt nur geringfügig ab.

Die beiden Elastomere A und C wirken identisch auf das Bitumen: sie versteifen das Bitumen mit einem Anstieg des Kraftmaximums um etwa 135 % deutlich und bilden offensichtlich ein Netzwerk aus, durch das die zur Deformation notwendige Kraft zwischen der Deformation von 200 bis 400 mm nur geringfügig abnimmt. Trotz identischer Zugabemenge wirkt das Elastomer B stärker als die beiden anderen Elastomere: das Kraftmaximum ist um knapp 20 % höher und die Kraft nimmt nach Überschreiten eines Minimums bei einer Dehnung von 225 mm vergleichbar mit dem Verhalten höhermodifizierter Bitumen wieder zu.

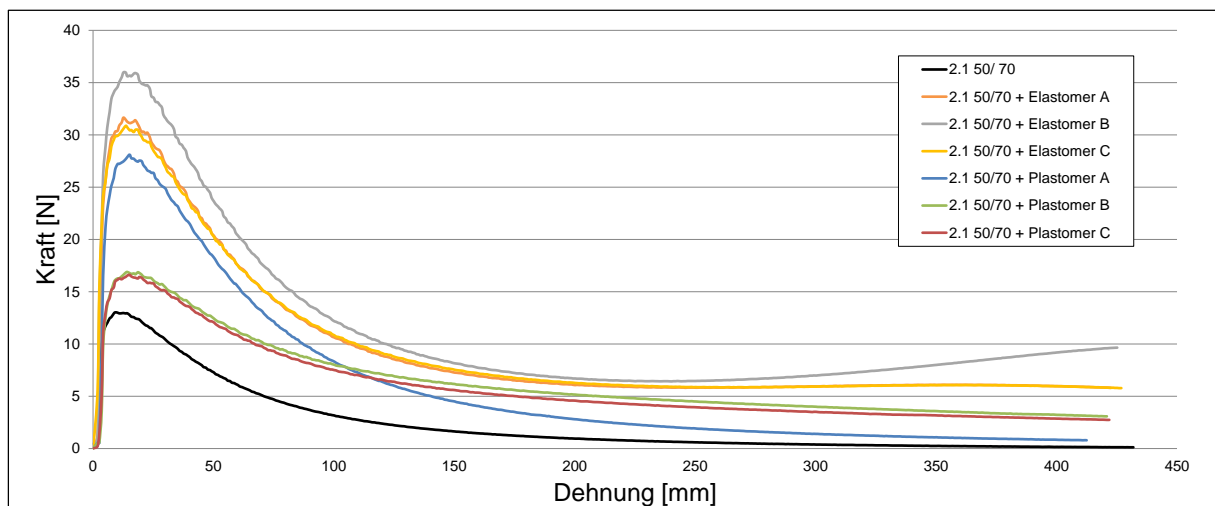


Bild 6-9: Kraftduktilitätsverlauf bei 15 °C des 2.1 50/70 vor bzw. nach der Modifizierung mit den Elastomeren bzw. Plastomeren

Die Untersuchungen mit dem DSR zeigen die für Polymermodifizierte Bitumen typische Reduzierung der Temperaturabhängigkeit (Bild 6-10). Die komplexen Schermo-

duln des Basisbitumens so wie der sechs unterschiedlichen Polymermodifizierten Bitumen weisen bei Temperaturen unterhalb von 10 °C nur geringe Differenzen auf. Ab einer Temperatur von 10 °C ist eine signifikante Versteifung durch die drei Elastomere und das Plastomer A festzustellen, was die Auswertung der Kraftmaxima bei 15 °C bestätigt. Mit zunehmender Erwärmung nimmt die versteifende Wirkung der Polymere bis zu einer Temperatur von 70 °C kontinuierlich zu. Ab dieser Temperatur bewirken die Elastomere A und C sowie das Plastomer A eine konstante Erhöhung des komplexen Schermoduls von etwa 100 % (Elastomer A), 140 % (Elastomer C) bzw. 70 % (Plastomer A) bezogen auf die komplexen Schermoduln des nicht modifizierten Bitumens bei jeweils identischer Temperatur. Die versteifende Wirkung des Elastomers B steigt vor allem oberhalb von 70 °C bei zunehmender Erwärmung überproportional an, sodass der gemessene komplexe Schermodul bei 150 °C den des Basisbitumens um den Faktor 12 übersteigt. Dieses Materialverhalten wird vermutlich durch eine extrem starke Netzwerkbildung der Polymere verursacht, wodurch selbst bei 150 °C kein idealviskoses Fließen des Polymermodifizierten Bitumens auftritt. Im Gegensatz dazu verhalten sich die übrigen Polymermodifizierten Bitumen bereits bei 100 °C wie Newtonsche Fluide.

Die Plastomere B und C zeigen bis zu einer Temperatur von 50 °C praktisch keine versteifende Wirkung auf das Bitumen (vgl. geringen Einfluss auf die Kraftmaxima bei 15 °C). Erst bei einer weiteren Erwärmung ist eine Erhöhung der komplexen Schermoduln festzustellen. Ab einer Temperatur von 100 °C bewirkt das Plastomer B eine konstante Erhöhung des komplexen Schermoduls um etwa 80 % und das Plastomer C um etwa 50 % gegenüber dem nicht modifizierten Bitumen.

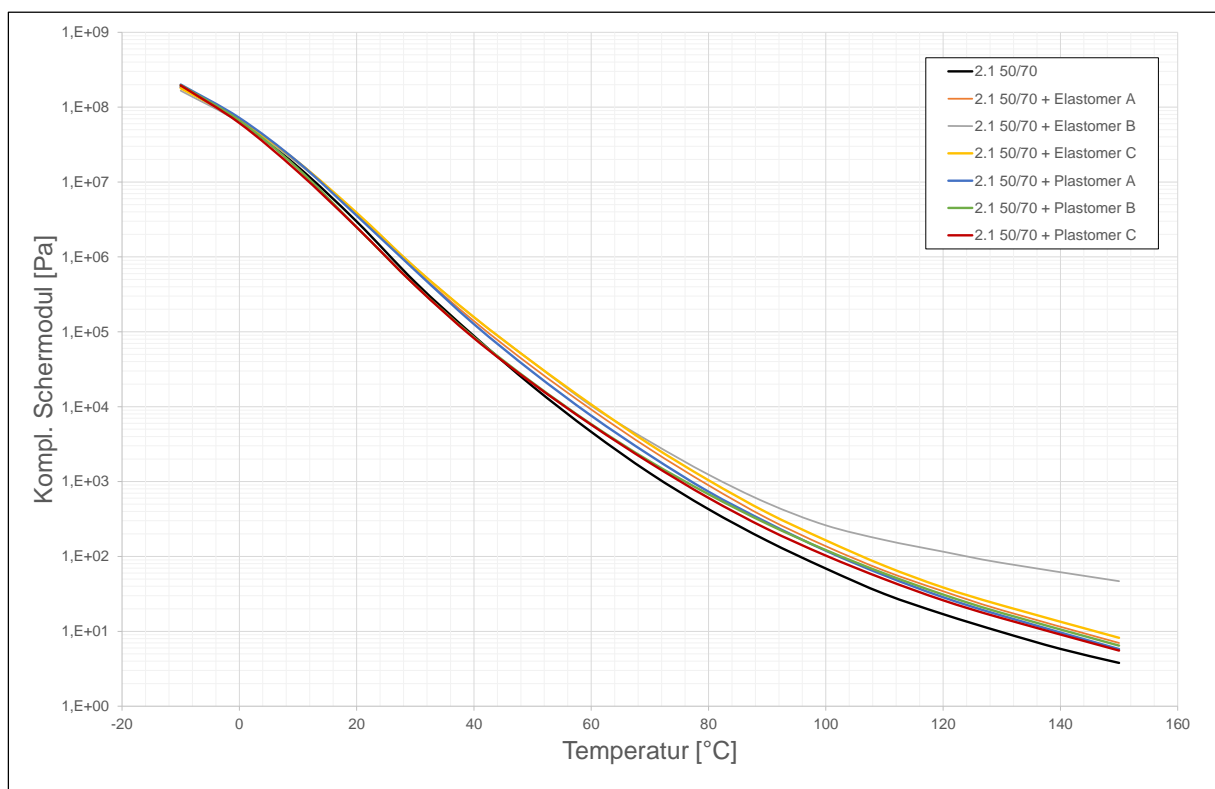


Bild 6-10: Komplexe Schermoduln in Abhängigkeit von der Temperatur des Bitumen 2.1 50/70 vor bzw. nach der Modifizierung mit den Elastomeren bzw. Plastomeren

Die klassischen Kennwerte Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel bestätigen die anhand des temperaturabhängigen komplexen Schermoduls und der Kraftduktivität beschriebenen Einflüsse der Polymere. Während die Plastomere B und C die bei 25 °C gemessene Nadeleindringtiefe lediglich um etwa 3 1/10 mm reduzieren, bewirken die übrigen Polymere mit Rückgängen von 9 bis 12 1/10 mm eine deutliche Versteifung. Der Erweichungspunkt Ring und Kugel wird dagegen durch alle Polymere deutlich erhöht. Im Fall der Plastomere beträgt der Anstieg im Mittel 5,8 °C, während der Erweichungspunkt Ring und Kugel durch den Einsatz der Elastomere um durchschnittlich 8,6 °C steigt. Den mit einem Anstieg von 9,8 °C größten Einfluss hat auch hier das Elastomer B, das auch den größten Einfluss auf die Kraftduktivität und den komplexen Schermodul zeigte.

Der Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel ist bei allen Polymeren stärker als der Anstieg des komplexen Schermoduls. Die in Kapitel 6.1.1 definierte Äquiviskositätstemperatur, bei der der komplexe Schermodul den Wert 15 kPa aufweist, weicht hierdurch signifikant von der Temperatur des Erweichungspunktes Ring und Kugel ab (siehe Bild 6-7).

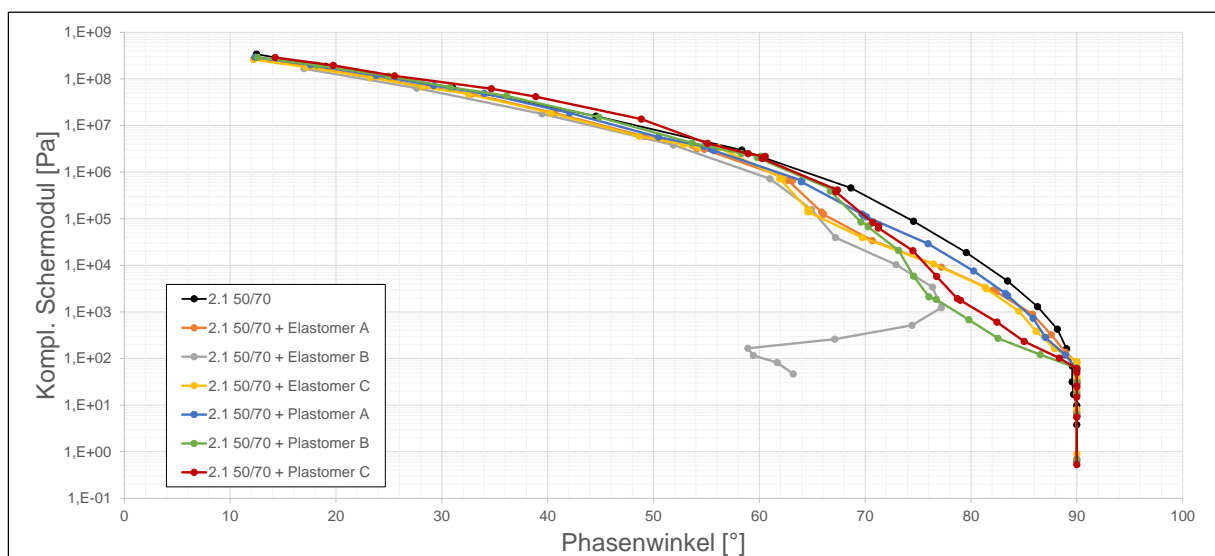


Bild 6-11: Black-Diagramm des Bitumen 2.1 50/70 vor bzw. nach der Modifizierung mit den Elastomeren bzw. Plastomeren

Im Black-Diagramm (Bild 6-11) wird unter Einbeziehung des Phasenwinkels die grundsätzlich typische, mit Ausnahme des Elastomers B jedoch relativ gering ausgeprägte Wirkung der Polymere deutlich. Das Plastomer A bewirkt die geringste auf den komplexen Schermodul bezogene Reduzierung des Phasenwinkels, die zwischen 100 Pa und 1 MPa bzw. zwischen 40 und 90 ° konstant verläuft. Die Wirkung der Plastomere B und C ist im Black-Diagramm lediglich im Bereich der Phasenwinkel von 70 bis 90 ° festzustellen. In diesem Bereich ist die Reduzierung des steifigkeitsabhängigen Phasenwinkels jedoch deutlich ausgeprägter als bei dem Plastomer A.

Die Wirkung der Elastomere A und C zeigt sich bei der Darstellung im Black-Diagramm vor allem bei Phasenwinkeln von 60 bis 80 °. In diesem Bereich sind die komplexen Schermoduln trotz identischem Phasenwinkel deutlich geringer, während der übrige

Funktionsverlauf etwa dem des mit dem Plastomer A modifizierten Bitumens entspricht. Die Wirkung des Elastomers B tritt bei komplexen Schermoduln < 1 kPa sehr deutlich auf. Da das modifizierte Bitumen in diesem Fall selbst bei hohen Temperaturen und den damit verbundenen relativ geringen komplexen Schermoduln kein viskoses Fließen, sondern stark ausgeprägtes elastisches Verhalten aufweist, werden selbst geringen komplexen Schermoduln deutlich unter 1 kPa noch Phasenwinkel unter 70° zugeordnet.

Da keines der verwendeten Polymere die Kälteeigenschaften nachteilig beeinflusst und die Plastomere geringfügig und die Elastomere stärker die Verformungsbeständigkeit bei hohen Temperaturen verbessern, vergrößern alle Zusätze die Plastizitätsspanne des Bitumens. Zudem bilden alle Polymere offensichtlich Netzwerke im Bitumen aus, die im Fall des Plastomers A schwach, im Fall des Elastomers B sehr stark und bei den übrigen Zusätzen mittelstark ausgeprägt sind.

6.1.3 Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Straßenbaubitumen

Der statistische Vergleich der chemischen Zusammensetzung in Bild 5-8 zeigt bezüglich der Aliphaten, Aromaten und polaren Verbindungen keine charakteristischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Bitumensorten. Die Streuungen innerhalb der Gruppen gleicher Bitumensorte weisen wesentlich größere Differenzen auf als die Mittelwerte der unterschiedlichen Bitumensorten. Aus der SARA-Analyse und dem Asphaltstatus nach ZENKE gehen dennoch charakteristische Unterschiede zwischen harten und weichen Bitumensorten hervor. So veranschaulicht das Dreistoffdiagramm in Bild 6-12 beispielhaft, dass die weichen Bitumen 160/220 im Allgemeinen einen niedrigeren Anteil an Aliphaten und Asphaltene haben als die harten Bitumen 20/30. Der Anteil der Aromaten ist im Gegenzug bei den Bitumen 160/220 tendenziell höher, während die polaren Verbindungen der unterschiedlichen Bitumensorten keinen charakteristischen Unterschied aufweisen. Die deutlichen Unterschiede in der Gruppe der Aliphaten und Asphaltene beruht auf dem wesentlich höheren Asphaltengehalt der härteren Bitumensorten: der gemittelte Asphaltengehalt beträgt im Fall der Bitumen 20/30 22,2 M.-% und im Fall der Bitumen 160/220 14,1 M.-%, während der Anteil der Aliphaten mit 9,1 M.-% bei den harten Bitumen 20/30 im Mittel sogar höher ausfällt als bei den weichen Bitumen 160/220 mit 11,0 M.-%. Die aufgrund der Übersichtlichkeit in Bild 6-12 nicht dargestellten Bitumensorten weisen mit abnehmender Härte einen stetig abnehmenden Asphaltengehalt auf: im Mittel beträgt der Asphaltengehalt bei dem Bitumen 30/45 21,7 M.-%, bei dem Bitumen 50/70 18,7 M.-% und bei dem Bitumen 70/100 16,8 M.-%.

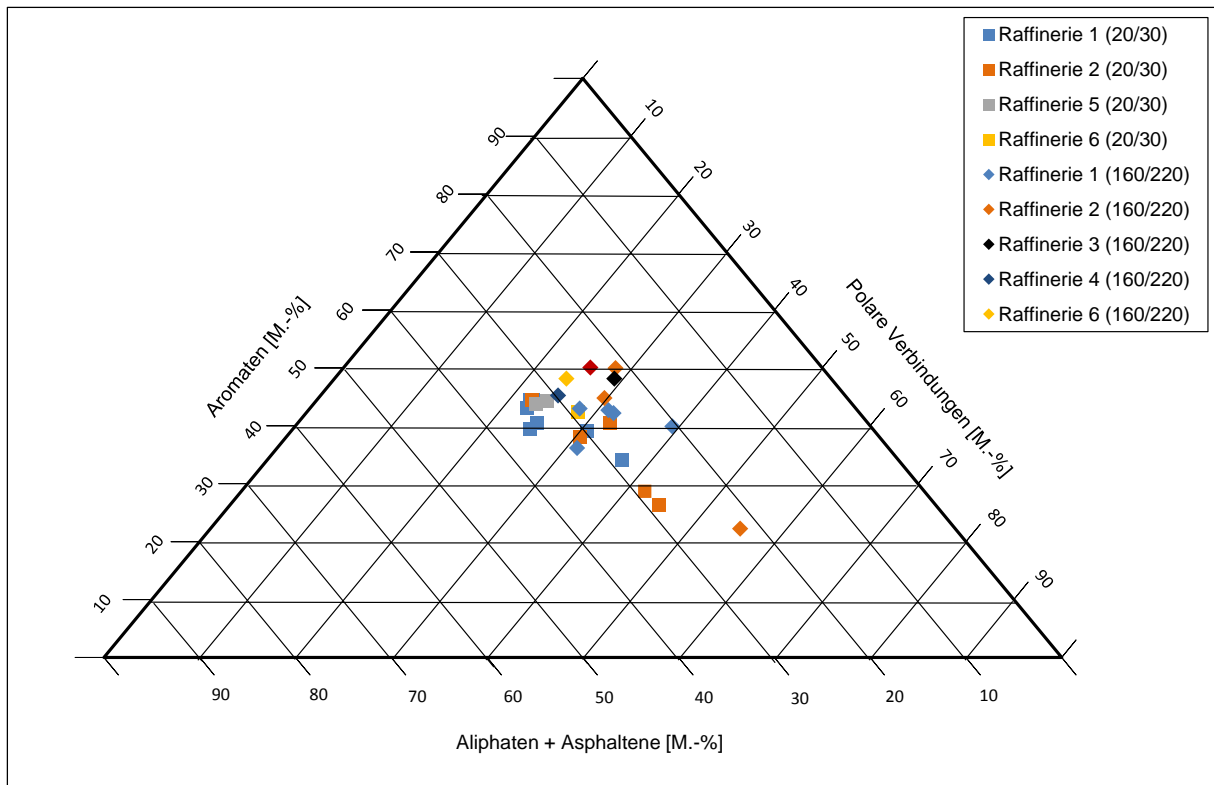


Bild 6-12: Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in Aromaten, polare Verbindungen und der Summe aus Aliphaten und Asphaltene der Bitumen 20/30 bzw. 160/220

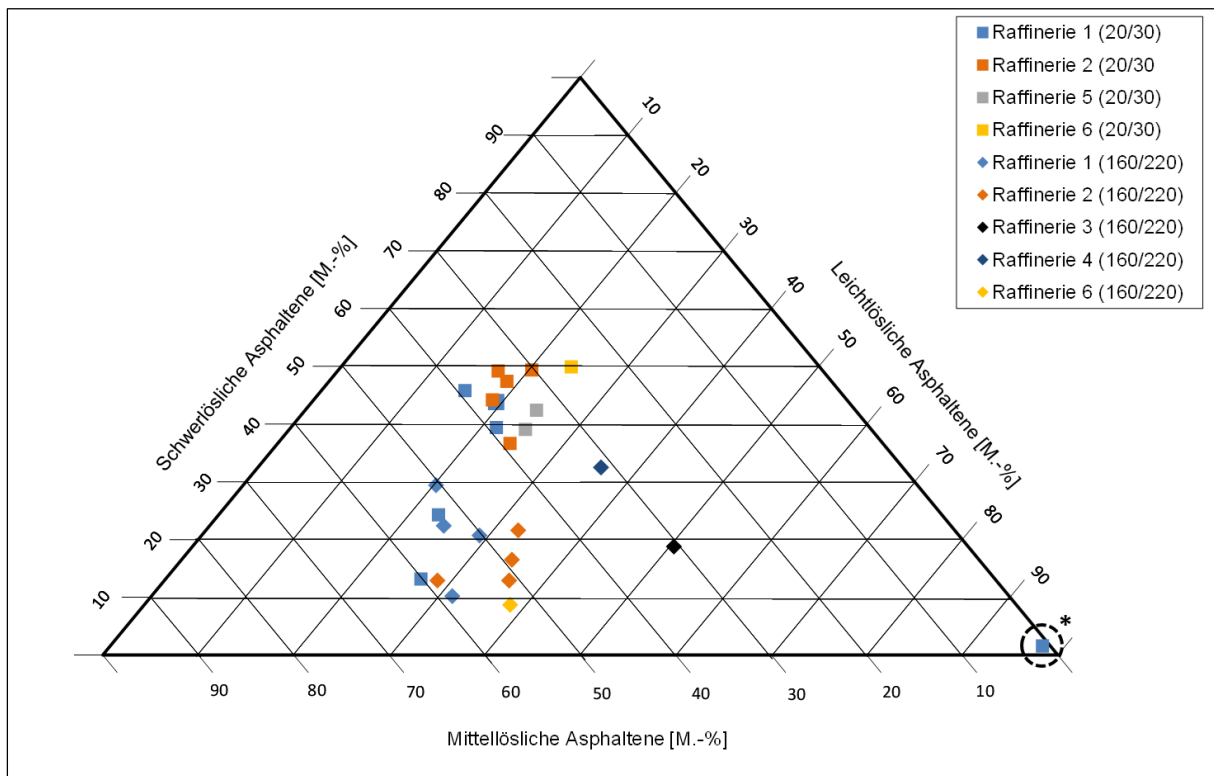


Bild 6-13: Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in leicht-, mittel- und schwerlösliche Asphaltene der Bitumen 20/30 bzw. 160/220 (* das auffällige Ergebnis wurde durch eine Überprüfung bestätigt)

In der Gruppe der Asphaltene ist ebenfalls ein charakteristischer Trend festzustellen: harte Bitumensorten weisen im Mittel einen höheren Anteil schwerlöslicher Asphaltene und dafür einen geringeren Anteil mittel- und leichtlöslicher Asphaltene auf als weiche

Bitumensorten. Bei einem Vergleich der Bitumensorten 20/30 und 160/220 gemäß Bild 6-13 beträgt der durchschnittliche Anteil schwerlöslicher Asphaltene an der gesamten Gruppe der Asphaltene bei dem härteren Bitumen 20/30 37,5 M.-% und bei dem weicheren 160/220 18,8 M.-%. Die aus Gründen der Übersichtlichkeit in Bild 6-13 nicht abgebildeten Bitumen bestätigen den beschriebenen Trend grundsätzlich: durchschnittlich beträgt der Anteil schwer löslicher Asphaltene bei den Bitumen 30/45 31,6 M.-%, bei den Bitumen 50/70 26,3 M.-% und bei den Bitumen 70/100 18,8 M.-%.

Die Siedeanalyse weist sehr deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Straßenbaubitumen auf (siehe Bild 5-9). Diese Unterschiede sind jedoch weitestgehend unabhängig von der Bitumensorte und damit von der Bitumensteifigkeit. Aus den für jede Bitumensorte gemittelten Siedetemperaturen sind keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Bitumenhärte zu ziehen (Bild 6-14). Im Mittel weisen die Bitumen 20/30, 50/70 und 70/100 das gleiche Siedeverhalten auf. Die Bitumen 30/45 und 160/220 weisen dagegen einen größeren Anteil an Molekülen auf, die bereits bei niedrigerer Temperatur sieden. Folglich kann ein Trend zu einem schnelleren Sieden bei niedrigeren Temperaturen mit abnehmender Bitumenhärte nicht festgestellt werden.

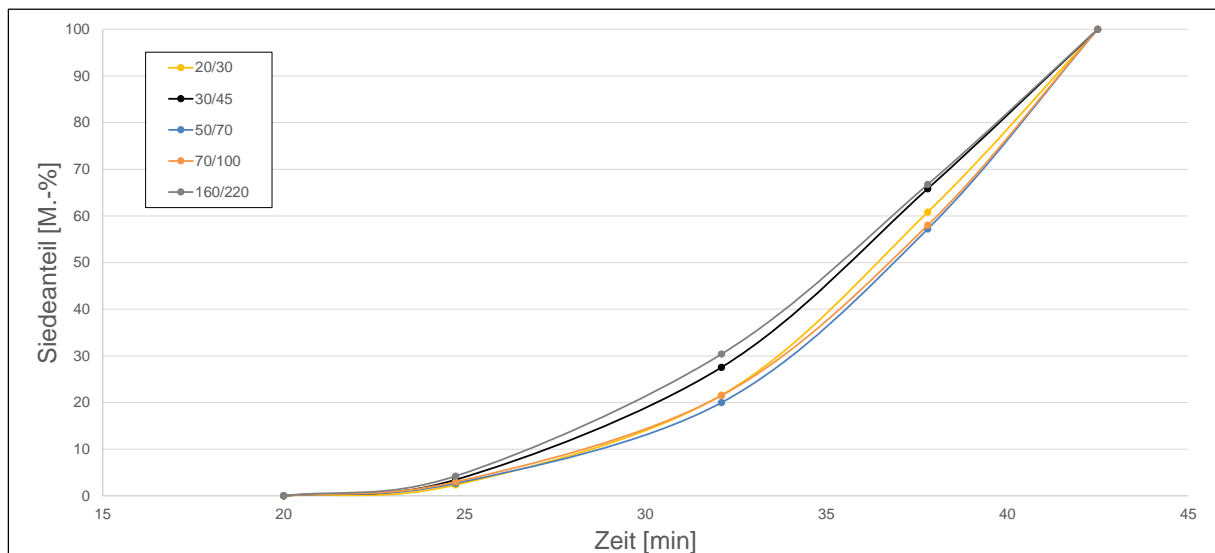


Bild 6-14: Siedeanalyse, jeweils dargestellt sind die Mittelwerte der Bitumensorten

Neben den zuvor geschilderten generellen Zusammenhängen zwischen der chemischen Zusammensetzung und der Bitumensorte bzw. der damit verbundenen Bitumenhärte bestehen bei den untersuchten Straßenbaubitumen direkte Zusammenhänge zwischen den einzelnen physikalischen Kennwerten und der chemischen Zusammensetzung. Vor allem die Ergebnisse der SARA-Analyse liefern Aufschlüsse über die physikalischen Eigenschaften der Bitumen. Mittels multipler linearer Regression können auf Basis der 90 untersuchten Bitumen die physikalischen Kennwerte durch die Anteile der Aliphaten, Aromaten, polaren Verbindungen und Asphaltene mit unterschiedlichen Präzisionen berechnet werden. Die nach den folgenden Gleichungen 6-1 bis 6-6 berechneten Kennwerte zur Charakterisierung des Kälteverhaltens weisen ebenso wie die Nadelpenetration relativ große Abweichungen zu den Messwerten auf. Die Bestimmtheitsmaße für die Korrelation zwischen den berechneten und den gemessenen Größen betragen lediglich 0,34 (Biegekrechsteifigkeit), 0,43 (m-

Wert), 0,42 (Brechpunkt nach Fraaß) bzw. 0,44 (Nadelpenetration). Bei Erhöhung der Temperatur nimmt die Präzision bei der Bestimmung der physikalischen Eigenschaften aufgrund der chemischen Zusammensetzung zu. So betragen die Bestimmtheitsmaße zwischen den berechneten und den gemessenen Erweichungspunkten bzw. komplexen Viskositäten bei 120 °C 0,62 bzw. 0,67.

$$S = 816,5 - 13,6 \times Al - 10,0 \times Ar - 8,4 \times P + 11,8 \times As \quad (\text{Gl. 6-1}) \quad R^2 = 0,34$$

$$m = -0,062 + 0,012 \times Al + 0,006 \times Ar + 0,007 \times P - 0,006 \times As \quad (\text{Gl. 6-2}) \quad R^2 = 0,43$$

$$BP = 35,8 - 0,85 \times Al - 0,67 \times Ar - 0,60 \times P + 0,36 \times As \quad (\text{Gl. 6-3}) \quad R^2 = 0,42$$

$$PEN = 150,3 + 2,51 \times Al + 0,26 \times Ar + 0,97 \times P - 7,97 \times As \quad (\text{Gl. 6-4}) \quad R^2 = 0,44$$

$$EP_{RuK} = 74,1 - 0,48 \times Al - 0,53 \times Ar - 0,53 \times P + 1,00 \times As \quad (\text{Gl. 6-5}) \quad R^2 = 0,62$$

$$\log_{\eta^*_{(120\text{ °C})}} = 2,914 - 0,044 \times Al - 0,039 \times Ar - 0,042 \times P + 0,025 \times As \quad (\text{Gl. 6-6}) \quad R^2 = 0,67$$

mit:	S	Biegekriechsteifigkeit in [MPa]
	m	m-Wert in [-]
	BP	Brechpunkt nach Fraaß in [°C]
	PEN	Nadelpenetration bei 25 °C in [1/10 mm]
	ER RuK	Erweichungspunkt Ring und Kugel in [°C]
	$\log_{\eta^*_{(120\text{ °C})}}$	Logarithmus der komplexen Viskosität bei 120 °C in [Pa s]
	Al	Anteil der Aliphaten in [M.-%]
	Ar	Anteil der Aromaten in [M.-%]
	P	Anteil der polaren Verbindungen in [M.-%]
	As	Anteil der Asphaltene in [M.-%]

Ein höherer Asphaltengehalt wirkt sich unabhängig von der Temperatur versteifend auf das Bitumen aus (siehe Bild 6-15 bis Bild 6-18). Die Biegekriechsteifigkeit bei -16 °C, der Erweichungspunkt Ring und Kugel und die komplexe Viskosität bei 120 °C steigen und die Nadelpenetration sinkt. Bei kalten Temperaturen geht zudem das Relaxationsvermögen (= m-Wert) zurück und die Sprödigkeit (= Brechpunkt nach Fraaß) steigt. Da eine Erhöhung des Asphaltengehalts eine Reduzierung des Anteils der Maltene phase zur Folge hat, folgt aus einer Reduzierung der Maltene phase eine Zunahme der Steifigkeit. Die einzelnen Bestandteile der Maltene phase, die Aliphaten, Aromaten und polaren Verbindungen, unterscheiden sich hierbei nicht signifikant in ihrem Einfluss auf die physikalischen Kennwerte.

Eine weitere Aufteilung der Aromaten in Mono-, Di- und Poly-Aromaten liefert ebenso wie die zusätzliche Aufteilung der Asphaltene in die Gruppen der leicht-, mittel- und schwerlöslichen Asphaltene keine nennenswerte Verbesserung der Bestimmtheitsmaße. Trotz des in Bild 6-13 dargestellten Zusammenhangs zwischen der Bitumensorte und den unterschiedlich löslichen Asphaltene n, beeinflusst die Löslichkeit der Asphaltene die physikalischen Eigenschaften somit nicht entscheidend.

Zwischen den Ergebnissen der Siedeanalyse und den physikalischen Kennwerten besteht darüber hinaus – wie aus dem in Bild 6-14 dargestellten fehlenden Zusammenhang zwischen der Bitumensorte und dem Siedeverhalten zu erwarten – kein relevanter Zusammenhang.

Entsprechend den in Kapitel 3.1.2 beschriebenen auf [ZENKE, 1991] beruhenden Theorien ist der Asphaltgehalt folglich die maßgebende Größe für die Bitumensteifigkeit. Daher werden im Folgenden die Zusammenhänge zwischen den chemischen Bestandteilen und den temperaturabhängigen physikalischen Kenngrößen anhand des Asphaltgehalts der Bitumen beschrieben.

Die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Bitumeneigenschaften bei niedrigen Temperaturen und den Asphaltgehalten der einzelnen Bitumen sind relativ schwach. Die beste Korrelation weist der m-Wert auf. Wie in Bild 6-15 zu erkennen, nimmt der m-Wert mit steigendem Asphaltgehalt und damit steigender Bitumensteifigkeit ab. Entsprechend der Vorstellung des Bitumens als Kolloidsystem ist bei geringerem Asphaltgehalt eine bessere Beweglichkeit der Mizellen und damit ein besseres Relaxieren des Bitumens zu erwarten. Das Bestimmtheitsmaß von nur 0,38 bestätigt jedoch, dass die Zusammenhänge zwischen den Kälteeigenschaften der Bitumen und deren chemischer Zusammensetzung gering ist. Der ebenfalls in Bild 6-15 dargestellte Zusammenhang zwischen dem Asphaltgehalt und der Biegekriechsteifigkeit bei -16 °C ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,31 noch geringer. Der Trend zu einer höheren Steifigkeit bei steigendem Asphaltgehalt ist prinzipiell vorhanden, mathematisch aber nicht konkret zu quantifizieren.

Ungewöhnlich ist in Bild 6-15 die überwiegende Position der Wertepaare der Bitumen 160/220.

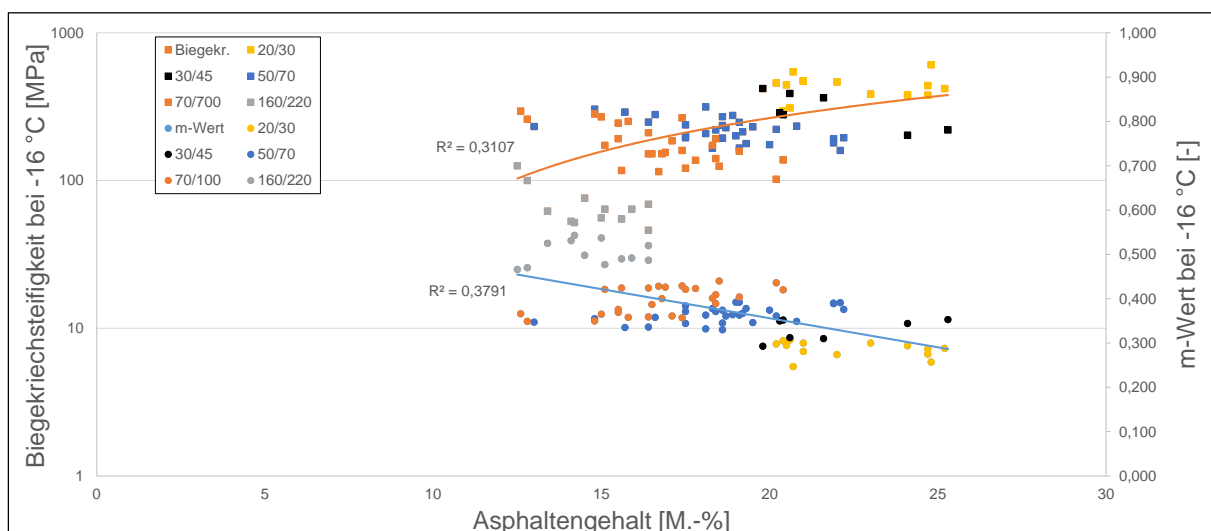


Bild 6-15: Biegekriechsteifigkeit bzw. m-Wert bei -16 °C in Abhängigkeit vom Asphaltgehalt der Bitumen

Im Gebrauchstemperaturbereich werden sowohl die Steifigkeit als auch der elastische Verformungsanteil durch die Asphalene beeinflusst. In der Anschauung des Bitumens als Kolloidsystem reduziert ein geringerer Asphaltgehalt die Steifigkeit durch einen Rückgang des Bewegungswiderstandes infolge des sinkenden Mizellenvolumens. Dazu reduziert ein geringerer Asphaltgehalt die Elastizität durch geringere innere

Spannungen und Deformationen der Asphaltene selbst. Das Bestimmtheitsmaß zwischen dem Asphaltengehalt und dem Phasenwinkel bei 25 °C (Bild 6-16) zeigt mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,62 einen tendenziellen Zusammenhang auf, während das Bestimmtheitsmaß von 0,50 zwischen dem Asphaltengehalt und dem Logarithmus des komplexen Schermoduls einen schwächeren Trend dokumentiert. Hiermit besteht im Gebrauchstemperaturbereich eine exaktere Korrelation zwischen dem Asphaltengehalt und den Ergebnissen des DSR als zwischen den Ergebnissen der SARA-Analyse und der Nadelpenetration (Bestimmtheitsmaß für Gleichung 6-4: 0,44).

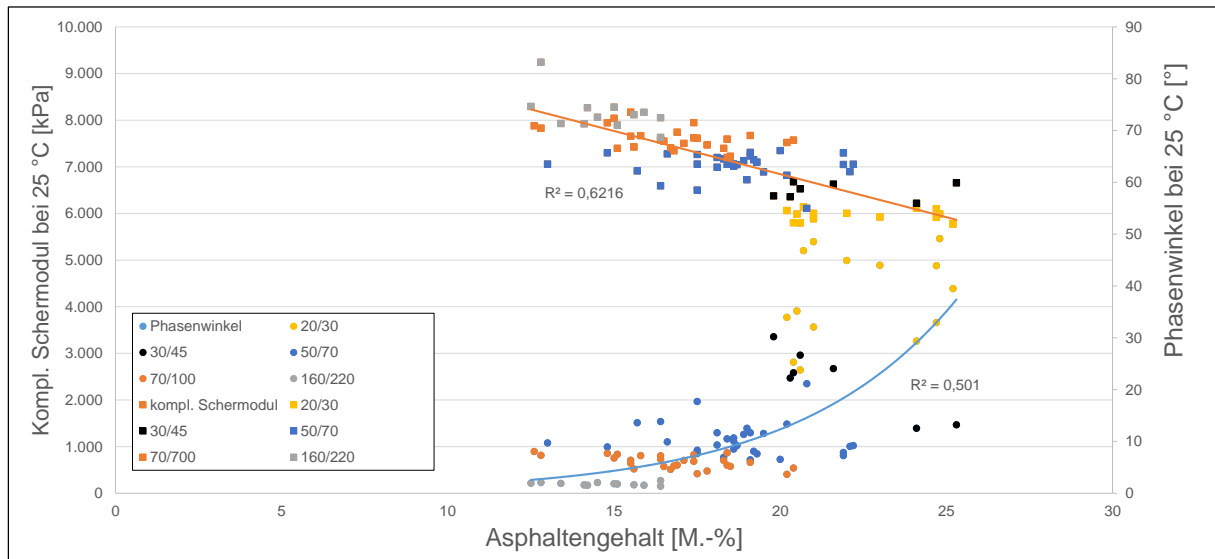


Bild 6-16: Korrelation zwischen dem Asphaltengehalt und dem komplexen Schermodul bzw. dem Phasenwinkel bei 25 °C

Wie bereits zuvor in diesem Kapitel beschrieben, nimmt der Einfluss des Asphaltengehalts auf die Steifigkeit mit zunehmender Temperatur und damit verbundenem zunehmend viskosem Fließverhalten des Bitumens zu. Hier scheint sich die deutliche Einflussnahme der Kolloidstruktur und der Übergang vom Gel- (unterer Gebrauchstemperaturbereich) zum Solzustand (Verarbeitungstemperaturbereich) bemerkbar zu machen. Zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel bzw. der damit bei Straßenbaubitumen korrespondierenden Äquiviskositätstemperatur (Temperatur, bei der der komplexe Schermodul 15 kPa beträgt; siehe Kapitel 6.1.1) und dem Asphaltengehalt bestehen daher klare Zusammenhänge. Das Bestimmtheitsmaß für eine einfache lineare Regression zwischen Asphaltengehalt und der Äquiviskositätstemperatur beträgt gemäß Bild 6-17 0,59. Bei reinviskosem Fließen ist die Steifigkeitszunahme mit zunehmendem Asphaltengehalt noch ausgeprägter. Das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen dem Asphaltengehalt und dem Logarithmus der komplexen Viskosität bei 120 °C beträgt 0,66 (Bild 6-18).

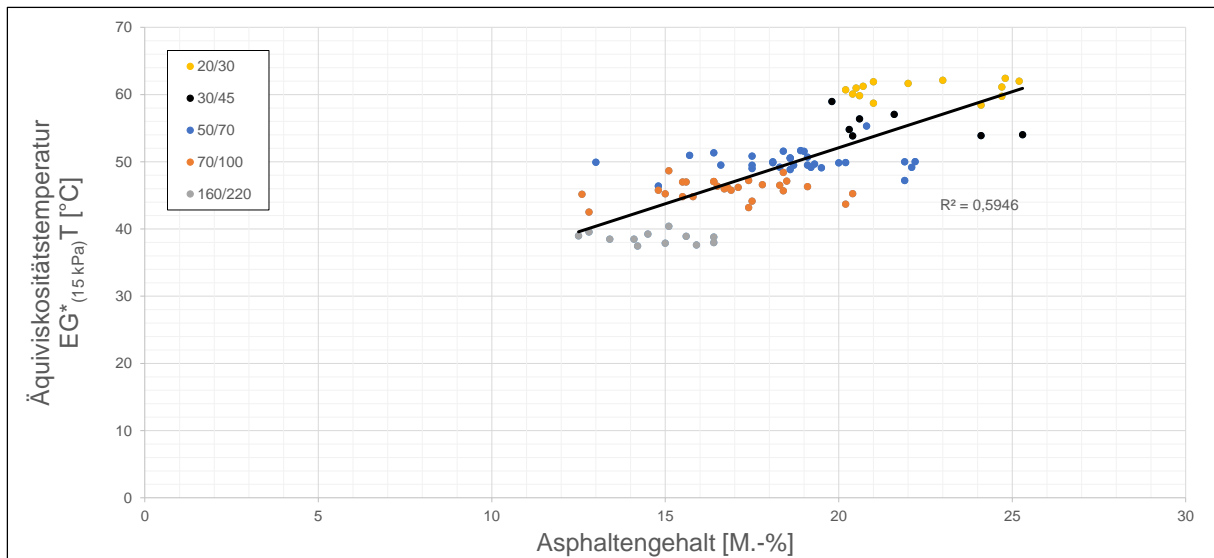


Bild 6-17: Korrelation zwischen dem Asphaltgehalt und der Äquivalenztemperatur (= Temperatur, bei der der komplexe Schermodul 15 kPa beträgt)

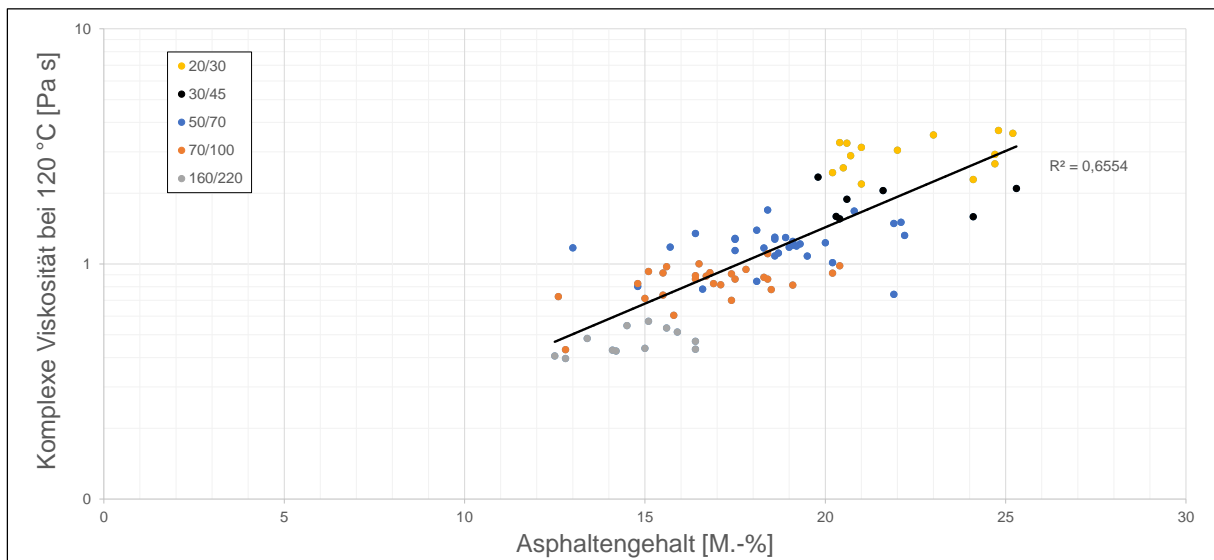


Bild 6-18: Korrelation zwischen dem Asphaltgehalt und der komplexen Viskosität bei 120 °C

Die Temperaturabhängigkeit der untersuchten Straßenbaubitumen nimmt mit zunehmendem Asphaltgehalt tendenziell ab. Bei Untersuchungen mittels DSR verdeutlicht dies der Quotient aus den komplexen Schermodulen bei 0 und bei 60 °C, der mit zunehmendem Asphaltgehalt deutlich abnimmt. Das Bestimmtheitsmaß für den logarithmischen Zusammenhang zwischen diesen Größen beträgt 0,62 (Bild 6-19). Wie bereits bezüglich des Kälte-, Gebrauchstemperatur- und Wärmeverhaltens gezeigt, versteifen demnach die Asphaltene das Bitumen bei hohen Temperaturen maßgebend, während der Einfluss auf die Steifigkeit bei niedrigen Temperaturen gering ist. Bezüglich der konventionellen Kennwerte Erweichungspunkt Ring und Kugel ist dieser Zusammenhang jedoch minimal. Das Bestimmtheitsmaß für die Zunahme der Plastizitätsspanne bei zunehmendem Asphaltgehalt beträgt lediglich 0,15.

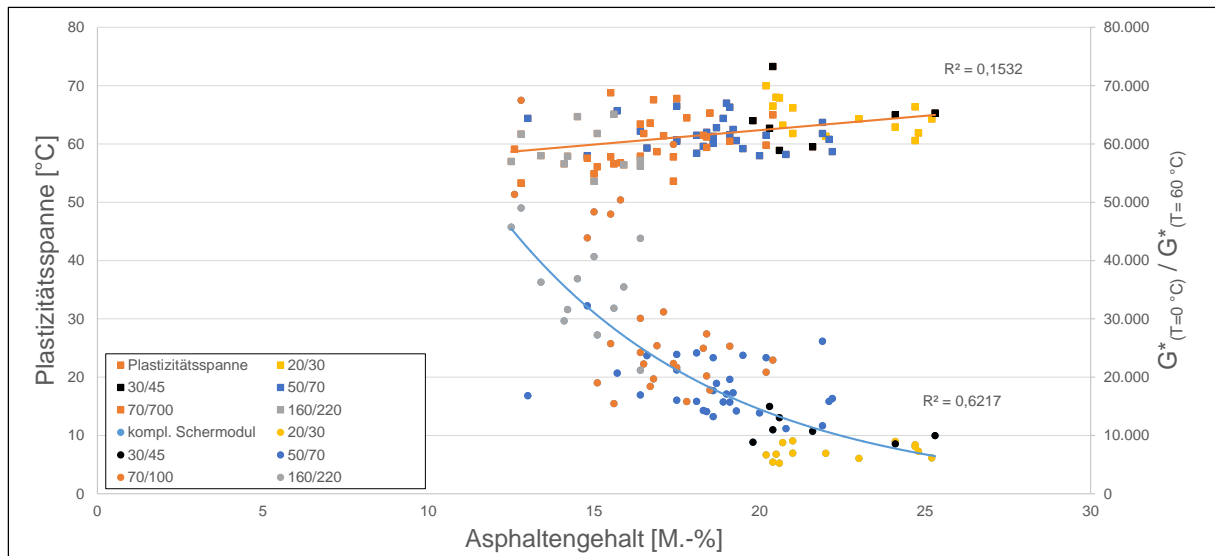


Bild 6-19: Korrelation zwischen dem Asphaltgehalt und der Plastizitätsspanne bzw. dem Quotienten aus dem komplexen Schermodul bei 0 °C und dem komplexen Schermodul bei 60 °C

6.1.4 Unterschiede in den Bitumeneigenschaften in Abhängigkeit von der liefernden Raffinerie

Mit dem DSR wurden die rheologischen Kennwerte komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei einer Frequenz von 1,59 Hz in Abständen von jeweils 10 °C zwischen -10 und +150 °C gemessen. Eine Gegenüberstellung der beiden Kennwerte mit dem Phasenwinkel auf der Abszisse und dem komplexen Schermodul im logarithmischen Maßstab auf der Ordinate, dem sogenannten Black-Diagramm, liefert grundlegende Informationen über das rheologische Verhalten der untersuchten Bitumen.

In Bild 6-20 bis Bild 6-22 sind die rheologischen Kennwerte der Bitumen 20/30, 30/45, 50/70, 70/100 und 160/220 der Raffinerien 1 und 2 (Bild 6-20), 4 und 5 (Bild 6-21) bzw. 6 und 7 (Bild 6-22) jeweils in Black-Diagrammen zusammengefasst. Da die geringe Anzahl von jeweils nur drei Proben keine aussagekräftige Analyse über mögliche Unterschiede zulässt, wurden die Bitumen der Raffinerien 3 und 8 hierbei nicht berücksichtigt.

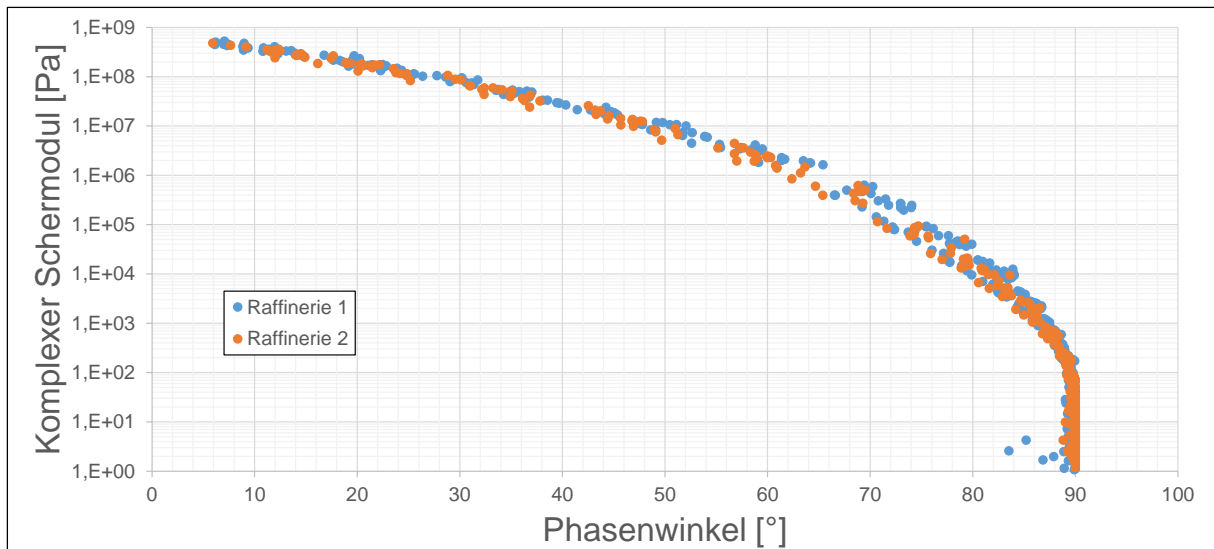


Bild 6-20: Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerien 1 und 2

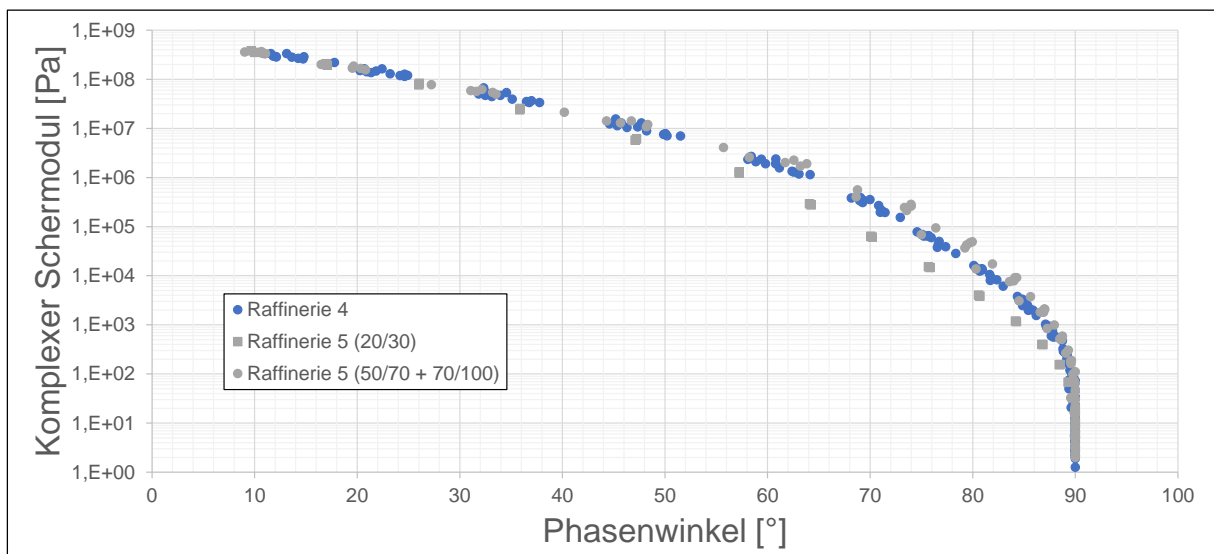


Bild 6-21: Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerien 4 und 5

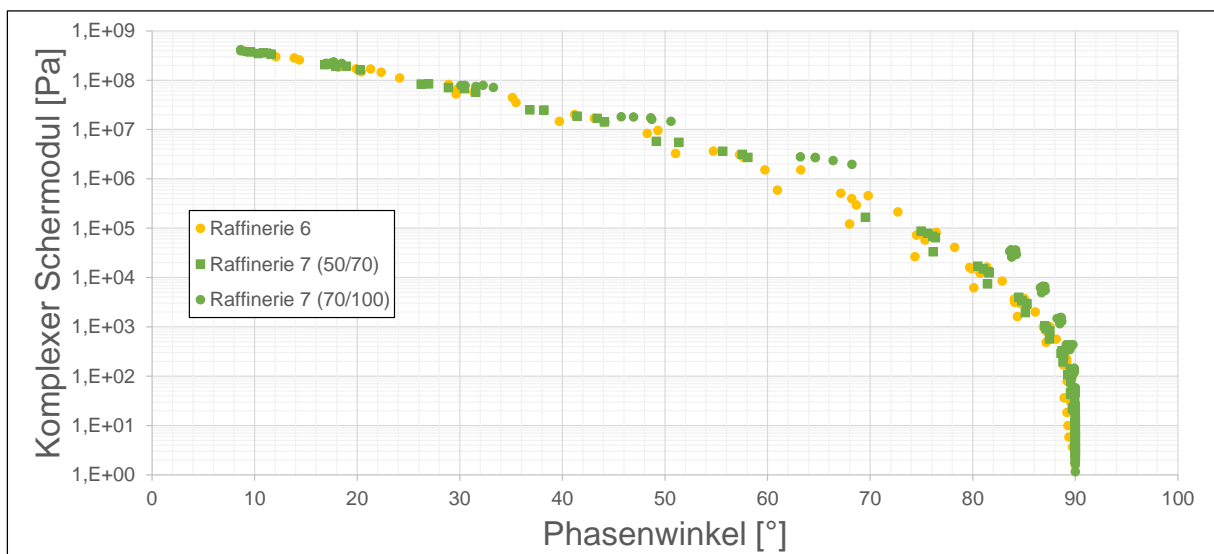


Bild 6-22: Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerien 6 und 7

Bei sehr hoher oder sehr niedriger Bitumensteifigkeit ist das Verhältnis zwischen komplexem Schermodul und Phasenwinkel bei allen untersuchten Straßenbaubitumen nahezu identisch. Charakteristische Unterschiede sind im Black-Diagramm zwischen Phasenwinkeln von 50 bis 80 ° bzw. zwischen komplexen Schermoduln von 1 kPa bis 10 MPa festzustellen. Dieses Spektrum entspricht etwa dem Temperaturbereich von 0 bis 40 °C bei sehr weichen bzw. 20 bis 70 °C bei sehr harten Bitumen. Bei höheren Temperaturen weisen die Straßenbaubitumen idealviskoses Verhalten auf. Unterschiede können nicht ausgemacht werden, da die Phasenwinkel unabhängig von dem komplexen Schermodul konstant 90 ° betragen. Bei niedrigen Temperaturen werden zwar deutlich abweichende Phasenwinkel bei den untersuchten Straßenbaubitumen festgestellt, jedoch zeigen die Phasenwinkel bei allen Proben eine nahezu identische Abhängigkeit zu den jeweils korrespondierenden komplexen Schermoduln. Das rheologische Verhalten der Straßenbaubitumen ist folglich bei niedrigen Temperaturen identisch. Die Bitumenhärte beeinflusst nur die Temperatur, bei der das Bitumen eine bestimmte Steifigkeit aufweist. Dies zeigt für Untersuchungen mit dem BBR auch Bild 5-4, in dem der direkte Zusammenhang zwischen m-Wert und Biegekiechsteifigkeit dargestellt ist.

Alle 14 Bitumen der Raffinerie 4 weisen trotz unterschiedlicher Bitumensorten (50/70, 70/100 und 160/220) keine Unterschiede im Black-Diagramm auf. Abgesehen von der Steifigkeit ist das rheologische Verhalten dieser Bitumen folglich identisch.

Bei Raffinerie 7 bestehen charakteristische Unterschiede zwischen den Bitumen unterschiedlicher Sorte. Die vier Bitumen 70/100 sind untereinander nahezu identisch. Mit Phasenwinkeln über 70 ° bei einem komplexen Schermodul von 1 MPa weisen sie im Vergleich aller Straßenbaubitumen einen hohen steifigkeitsabhängigen viskosen Verformungsanteil auf. Die Bitumen 50/70 sind dagegen bei gleichem komplexem Schermodul deutlich elastischer. Untereinander weisen drei der vier Bitumen 50/70 jedoch ebenfalls ein nahezu identisches rheologisches Verhalten auf.

Bei Raffinerie 5 bestehen ebenfalls charakteristische Differenzen zwischen den Bitumen unterschiedlicher Sorte. Die zwei Bitumen 20/30 weisen mit Phasenwinkeln unter 60 ° bei einem komplexen Schermodul von 1 MPa im Vergleich aller Bitumen einen sehr hohen elastischen Verformungsanteil auf. Die rheologischen Kennwerte der sechs Bitumen 50/70 und 70/100 liegen dagegen im Durchschnitt aller untersuchten Straßenbaubitumen. Mit Ausnahme eines Bitumen 50/70 zeigen die parallelen Funktionsverläufe im Black-Diagramm ein identisches rheologisches Verhalten.

Die sechs Bitumen der Raffinerie 6 (20/30, 30/45, 50/70, 70/100 bzw. 160/220) weisen durchweg rheologische Unterschiede auf. Die Funktionsverläufe im Black-Diagramm zeigen keine Gemeinsamkeiten.

Die Black-Diagramme der 27 bzw. 17 Bitumen der Raffinerien 1 bzw. 2 lassen deutliche Streuungen im Black-Diagramm erkennen. Auch zwischen den Bitumen gleicher Sorte sind Unterschiede im rheologischen Verhalten offensichtlich (siehe Anhang 1). Alle Bitumen sind mit Phasenwinkeln von 60 bis 70 ° bei einem komplexen Schermodul

von 1 MPa im Vergleich aller untersuchten Straßenbaubitumen unauffällig, wobei die Bitumen der Raffinerie 1 im Mittel etwas viskoser sind als die Bitumen der Raffinerie 2.

Das in den Black-Diagrammen dargestellte Verhältnis zwischen komplexem Schermodul und Phasenwinkel beschreibt das grundsätzliche rheologische Verhalten der Bitumen. Für konkrete baupraktische Anwendungen ist jedoch in erster Linie die Viskosität bei der Asphaltherstellung und vor allem die Steifigkeit bzw. die Sprödigkeit im Gebrauchstemperaturbereich von Interesse. Zum Vergleich der Bitumen unterschiedlicher Raffinerien bzw. der Bitumen, die jeweils aus der gleichen Raffinerie stammen, sind dazu in Bild 6-23 die Temperaturen des Erweichungspunktes Ring und Kugel und des Brechpunktes nach Fraaß für die untersuchten Bitumen 50/70 und 70/100 dargestellt. Für jede Raffinerie sind neben den Mittelwerten die minimalen und die maximalen Temperaturen und die Anzahl der untersuchten Proben angegeben.

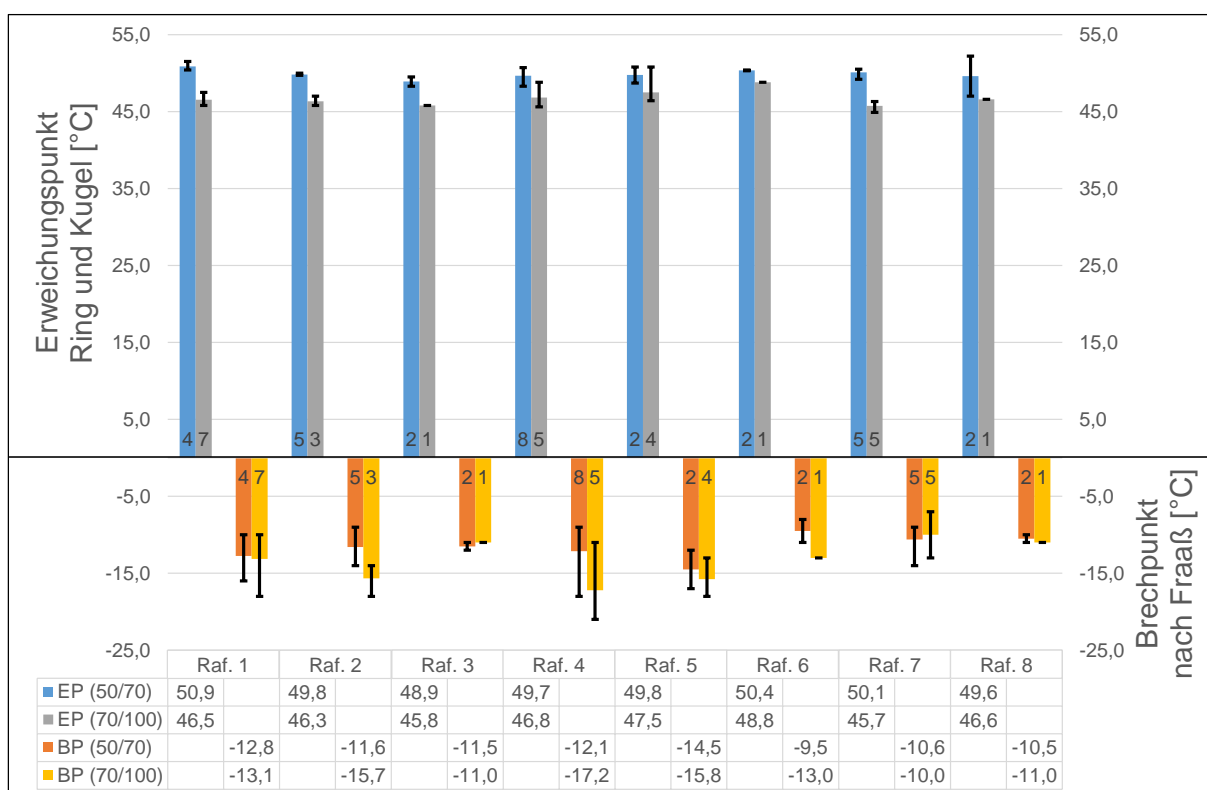


Bild 6-23: Mittelwert, Minimum, Maximum und Anzahl der Proben der Bitumen 50/70 und 70/100 der acht Raffinerien für den Erweichungspunkt Ring und Kugel und den Brechpunkt nach Fraaß

Die Mittelwerte der Erweichungspunkte Ring und Kugel liegen zwischen 48,9 °C (Raffinerie 3) und 50,9 °C (Raffinerie 1) bei den Bitumen 50/70 und bei den Bitumen 70/100 zwischen 45,7 °C (Raffinerie 7) und 48,8 °C (Raffinerie 6). Damit weisen die Mittelwerte der Erweichungspunkte Ring und Kugel der dargestellten Bitumen aller acht Raffinerien nur geringe Differenzen auf. Alle Kennwerte liegen zudem deutlich innerhalb des durch die [TL Bitumen-StB, 2013] vorgegebenen Anforderungsbereichs. Sämtliche Mittelwerte der Brechpunkte nach Fraaß erfüllen ebenfalls die Anforderungen der [TL Bitumen-StB, 2013], wobei zwei Bitumen 70/100 der Raffinerie 7 den Maximalwert von -10 °C um 2 bzw. 3 °C überschreiten. Die Brechpunkte der verschiedenen Raffinerien zeigen mit gemittelten -9,5 bis -14,5 °C (Bitumen 50/70) bzw. -10,0 bis -17,2 °C

(Bitumen 70/100) wesentlich größere Unterschiede als die Erweichungspunkte Ring und Kugel.

An den Bitumen gleicher Raffinerie wurden unterschiedlich stark ausgeprägte Differenzen festgestellt. Hierbei sind die Differenzen der Erweichungspunkte Ring und Kugel mit wenigen Ausnahmen gering, während die Brechpunkte nach Fraaß bei Bitumen gleicher Sorte und Raffinerie in einigen Fällen deutliche Abweichungen von maximal 10 °C aufweisen.

Bei den Bitumen 50/70 bzw. 70/100 der Raffinerie 4 sind die Unterschiede der Erweichungspunkte Ring und Kugel mit 2,4 bzw. 3,2 °C und vor allem der Brechpunkte nach Fraaß mit 6,0 bzw. 10,0 °C relativ groß. Trotz des aus dem Black-Diagramm hervorgehenden identischen rheologischen Verhaltens weisen die Bitumen somit unterschiedliche Steifigkeiten auf. Vergleichbares gilt für die Bitumen der Raffinerien 5 und 7. Im Fall der Raffinerie 5 beträgt die maximale Differenz der Erweichungspunkte Ring und Kugel bei den Bitumen 70/100 trotz geringer Unterschiede im Black-Diagramm sogar 4,4 °C. Bitumen gleicher Sorte der Raffinerien 1 und 2, von denen die meisten Proben vorliegen, weisen im Gegensatz zu den Bitumen der Raffinerien 4, 5 und 7 trotz deutlicher Unterschiede in den Black-Diagrammen mit Abweichungen von 0,3 bis 1,7 °C nur geringe Abweichungen bei den Erweichungspunkten Ring und Kugel auf. Die Brechpunkte dieser Bitumen weisen mit Streuungen von 4 bis 8 °C jedoch deutliche Differenzen auf.

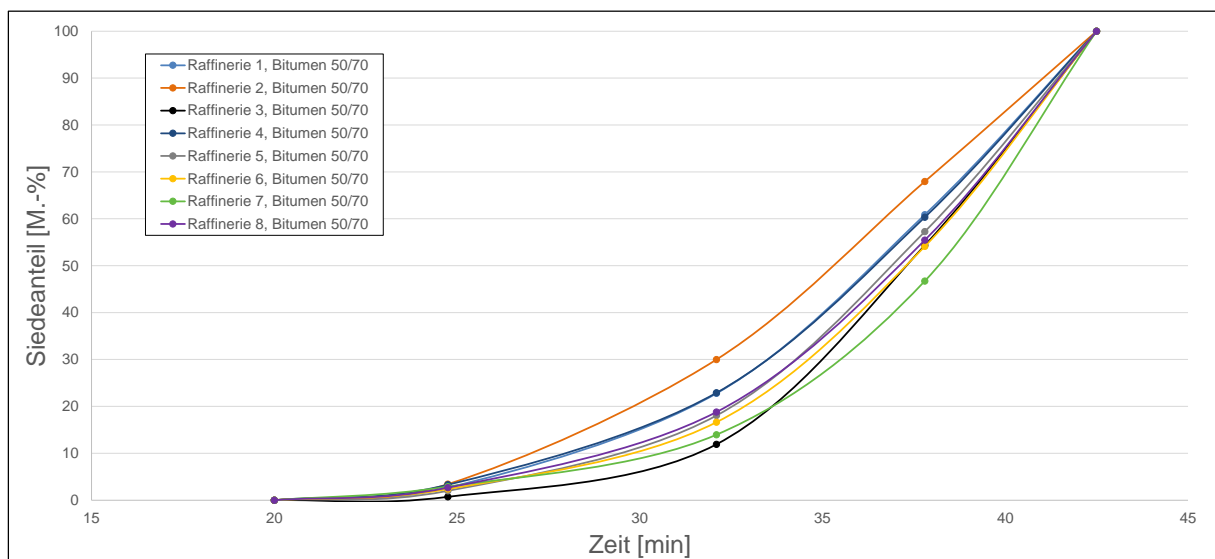


Bild 6-24: Siedeanalyse, jeweils dargestellt sind die Mittelwerte der Bitumen 50/70 der verschiedenen Raffinerien

Charakteristische Zusammenhänge zwischen der Bitumensteifigkeit und dem Siedeverhalten der Bitumen existieren gemäß Kapitel 6.1.3 nicht. So bestehen weitaus größere Differenzen im Siedeverhalten der Bitumen 50/70 unterschiedlicher Raffinerien als sie zwischen den unterschiedlichen Bitumensorten festgestellt werden (vgl. Bild 6-14 und Bild 6-24). Die Bitumen 50/70 der Raffinerien 2 und 7 verdeutlichen die fehlenden Zusammenhänge zwischen Bitumensteifigkeit und dem Siedeverhalten auch für Bitumen gleicher Sorte: trotz der mit einer Differenz von 0,3 °C nahezu identischen Erweichungspunkte Ring und Kugel weisen die Bitumen der Raffinerie 2 die größten

und die Bitumen der Raffinerie 7 die geringsten Anteile leichtsiedender Kohlenwasserstoffe auf.

Direkte Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Siedeanalyse und dem in Form des Black-Diagramms beschriebenen rheologischen Verhaltens bestehen ebenfalls nicht. Die Korrelationen zwischen den steifigkeitsabhängigen Phasenwinkeln bei einem komplexen Schermodul von 1 MPa (charakteristischer Bereich im Black-Diagramm) und dem Siedeanteil nach 32 Minuten der Gaschromatographie liefern mit Bestimmtheitsmaße kleiner 0,1 weder für die einzelnen Bitumensorten noch für die Bitumen einer Raffinerie einen Zusammenhang. Dennoch können in vielen Fällen Zusammenhänge bezüglich der Streuungen des rheologischen Verhaltens und des Siedeverhaltens festgestellt werden. Am Beispiel der Bitumen 50/70 der Raffinerien 2 und 7 ist in Bild 6-25 dargestellt, dass Bitumen mit abweichenden Funktionsverläufen im Black-Diagramm deutliche Streuungen im Siedeverhalten aufweisen (Raffinerie 2), während sowohl das Siedeverhalten als auch die Funktionsverläufe im Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerie 7 nur geringe Abweichungen zeigen. Diese Unterscheidung trifft in vielen Fällen auf die Streuungen zu, kann aber nicht auf die Kennwerte der einzelnen Bitumen übertragen werden.

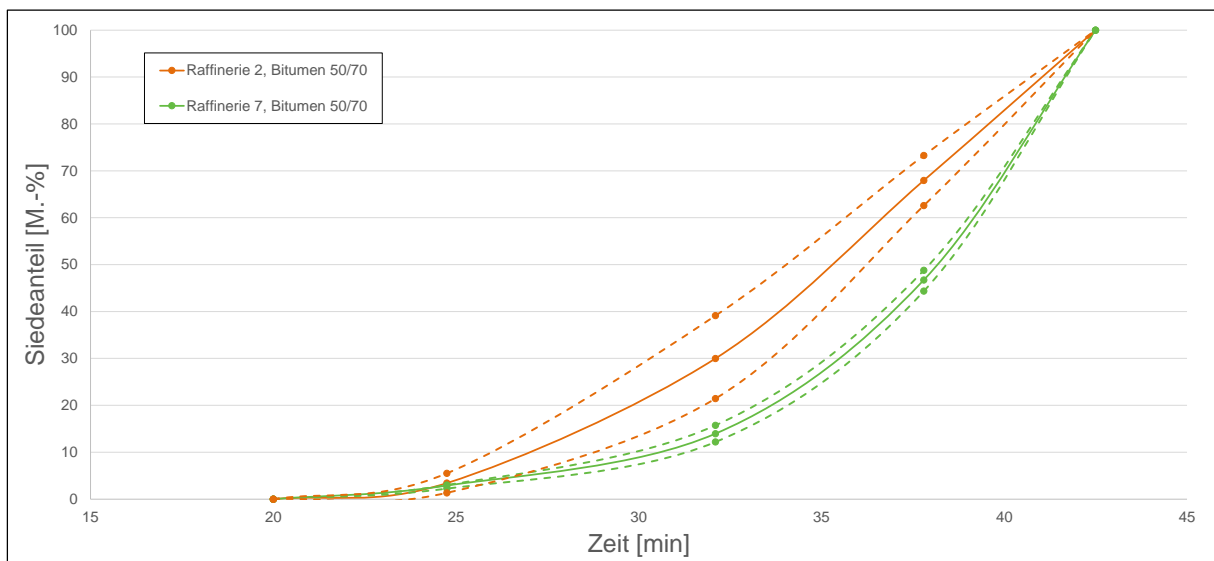


Bild 6-25: Siedeanalyse, jeweils dargestellt sind die Mittelwerte der Bitumen 50/70 der Raffinerien 1 und 7 sowie deren die Varianten mit den leichtest siedenden bzw. am schwersten siedenden Anteilen

Aus dem klassischen Dreistoffdiagramm zur Darstellung der Ergebnisse der SARA-Analyse geht eine starke Streuung der Bitumen 50/70 der Raffinerie 1 hervor (Bild 6-26). Zwei dieser Proben weisen mit 43,5 bzw. 50,0 M.-% außergewöhnlich hohe Anteile polarer Verbindungen und mit 30,6 bzw. 23,5 M.-% im Gegenzug einen sehr geringen Anteil an Aromaten auf. Die anderen Bitumen 50/70 der Raffinerie 1 liegen dagegen im Spektrum aller Bitumen 50/70, deren polare Verbindungen zwischen 21,9 und 33,5 M.-% und Aromatenanteile zwischen 38,6 und 50,5 M.-% betragen. Die Bitumen der übrigen Raffinerien weisen im Dreistoffdiagramm keine auffälligen Streuungen auf.

Eine separate Analyse der Asphaltengehalte, die im Dreistoffdiagramm nicht einzeln betrachtet werden, ist in Bild 6-27 dargestellt. Abgebildet sind die Mittelwerte je Raffinerie, die Minima und die Maxima sowie die Anzahl der Proben der Bitumen 50/70 und 70/100.

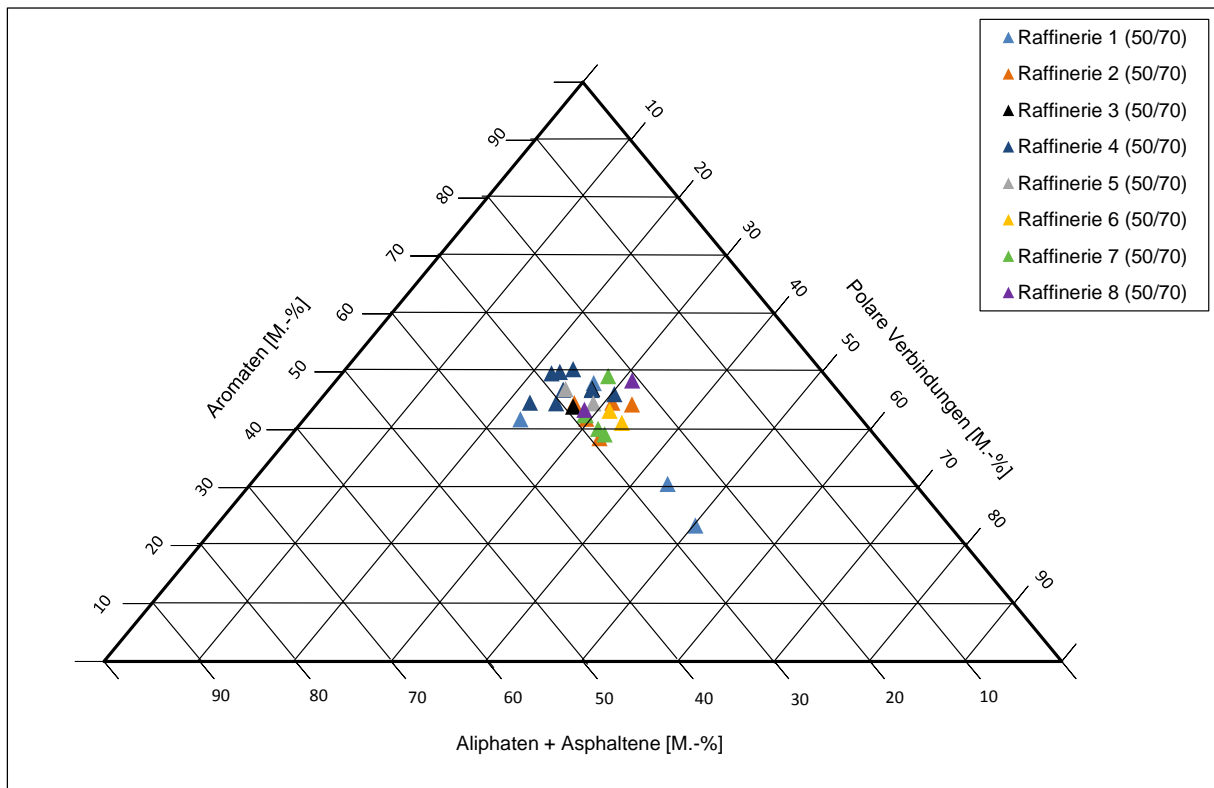


Bild 6-26: Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in Aromaten, polare Verbindungen und der Summe aus Aliphaten und Asphaltene der Bitumen 50/70

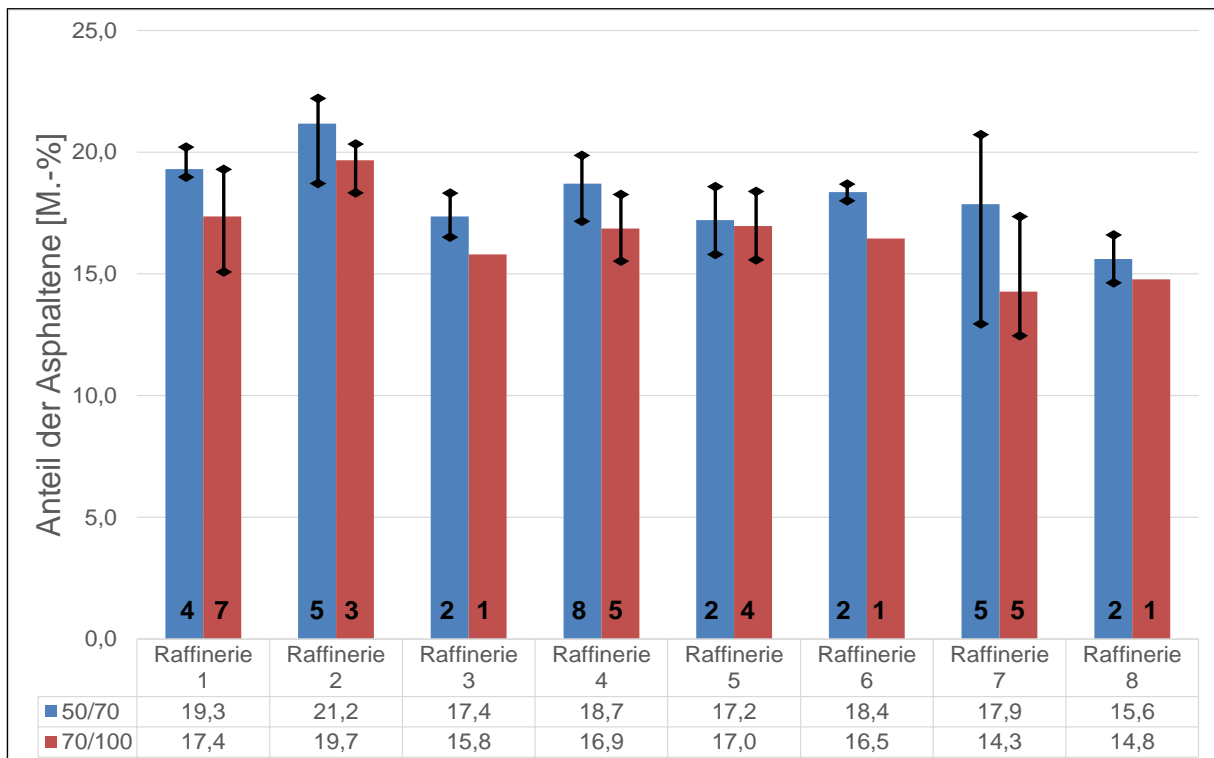


Bild 6-27: Mittelwert, Minimum, Maximum und Anzahl der Proben der Bitumen 50/70 und 70/100 der acht Raffinerien für den Asphaltengehalt

Trotz identischer Bitumensorte weisen die Asphaltgehalte der verschiedenen Raffinerien deutliche Unterschiede auf. Die Bitumen der Raffinerie 2 haben mit durchschnittlich 21,2 (50/70) bzw. 19,7 M.-% (70/100) die höchsten Asphaltgehalte. Demgegenüber haben im Mittel die Bitumen 50/70 der Raffinerie 6 mit 15,8 M.-% und die Bitumen 70/100 der Raffinerie 5 mit 14,3 M.-% die geringsten Asphaltgehalte.

Vergleichsweise große Streuungen des Asphaltgehalts sind bei den Bitumen der Raffinerie 7 festzustellen. Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Messwert beträgt bei den Bitumen 50/70 7,8 M.-% und bei den Bitumen 70/100 4,8 M.-%. Im Fall der Bitumen 50/70 wird die extreme Streuung jedoch durch eine Bitumenprobe verursacht, die mit einem Asphaltgehalt von 13,0 M.-% den Mittelwert der übrigen Proben dieser Raffinerie um 6,1 M.-% unterschreitet. Die Bitumen 50/70 und 70/100 der anderen Raffinerien weisen relativ konstante Asphaltgehalte auf. Im Mittel beträgt die Differenz zwischen Minimum und Maximum lediglich 2,1 M.-%.

Eine weitere Trennung der Asphaltene in deren leicht-, mittel- und schwerlösliche Anteile, also dem Asphaltstatus nach ZENKE, ist für die Bitumen 50/70 in Bild 6-28 dargestellt. Bei allen Raffinerien ist, mit Ausnahme von Raffinerie 7, eine recht hohe Schwankung in der Verteilung der Asphaltene zu erkennen.

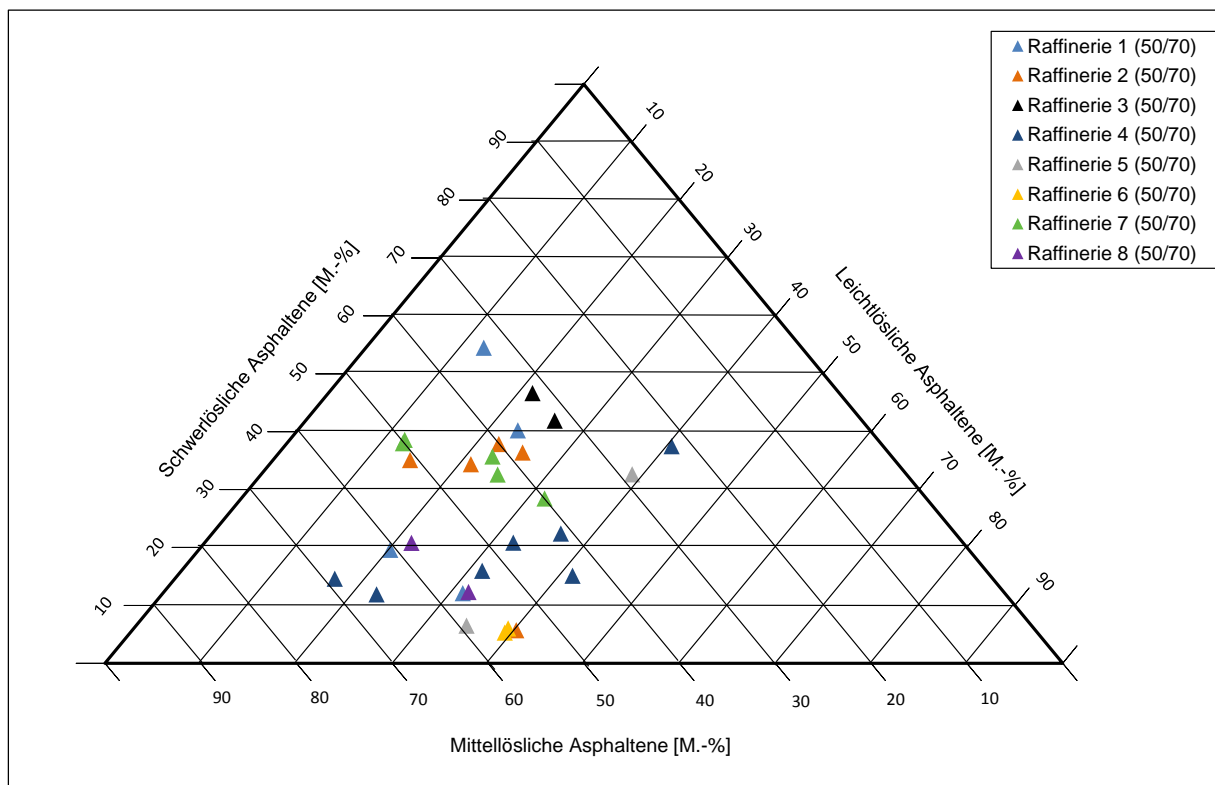


Bild 6-28: Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in leicht-, mittel- und schwerlösliche Asphaltene der Bitumen 50/70

6.1.5 Alterungsverhalten der untersuchten Straßenbaubitumen

Der Einfluss der Kurzzeitalterung wurde mit dem RTFOT-Verfahren untersucht, das durch hohe Temperaturen und die Zufuhr von Sauerstoff auf einen dünnen Bitumenfilm die thermisch-oxidativen Prozesse im Bitumen anregt. Die Massenänderungen der Bi-

tumen, die vor allem durch die Aufnahme von Sauerstoff oder durch Destillationsprozesse leichter Bestandteile verursacht werden können, entsprachen weitestgehend den Anforderungen der [TL Bitumen-StB 07, 2013] und waren damit unauffällig. Zusammenhänge zwischen dem Siedeverhalten und der Masseänderung bzw. der Steifigkeitszunahme konnten nicht festgestellt werden. Die Änderungen der physikalischen Kennwerte der Nadelpenetration und des Erweichungspunktes Ring und Kugel, an die in den [TL Bitumen-StB 07, 2013] Grenzwerte festgelegt sind, entsprechen ebenfalls mit einer Ausnahme diesen Anforderungen. Die durch die RTFOT-Alterung verursachten Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel fällt bei höheren Asphaltgehalten tendenziell etwas stärker aus, wobei dieser Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,25 sehr schwach ist (Bild 6-29). Zudem wird diese Tendenz vor allem durch die größere Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel härterer Bitumen verursacht.

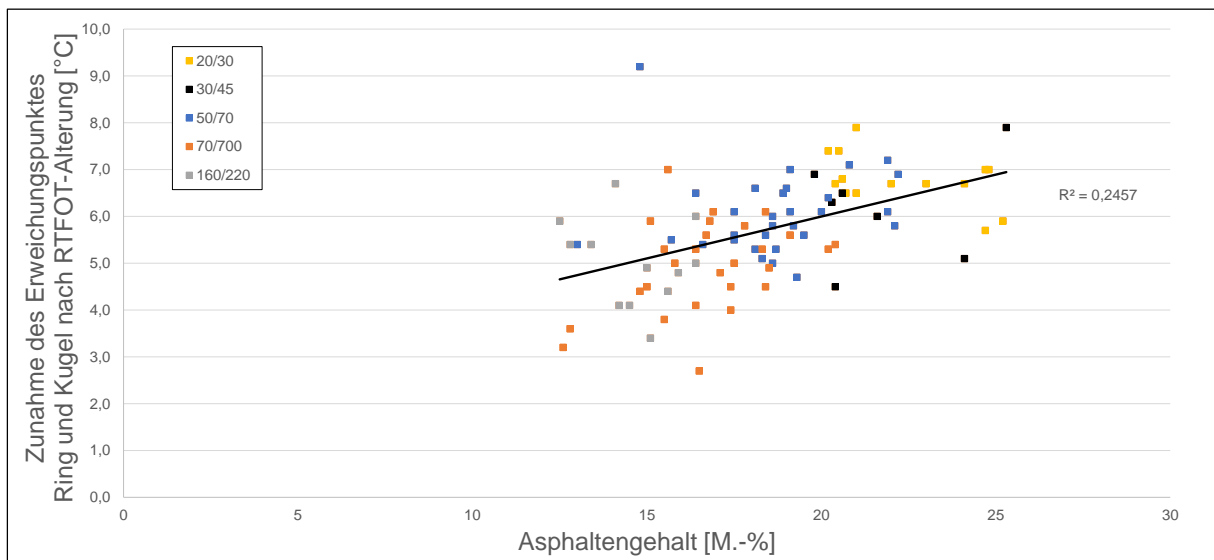


Bild 6-29: Asphaltgehalt der Frischbitumen in Abhängigkeit von der Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel durch die RTFOT-Alterung

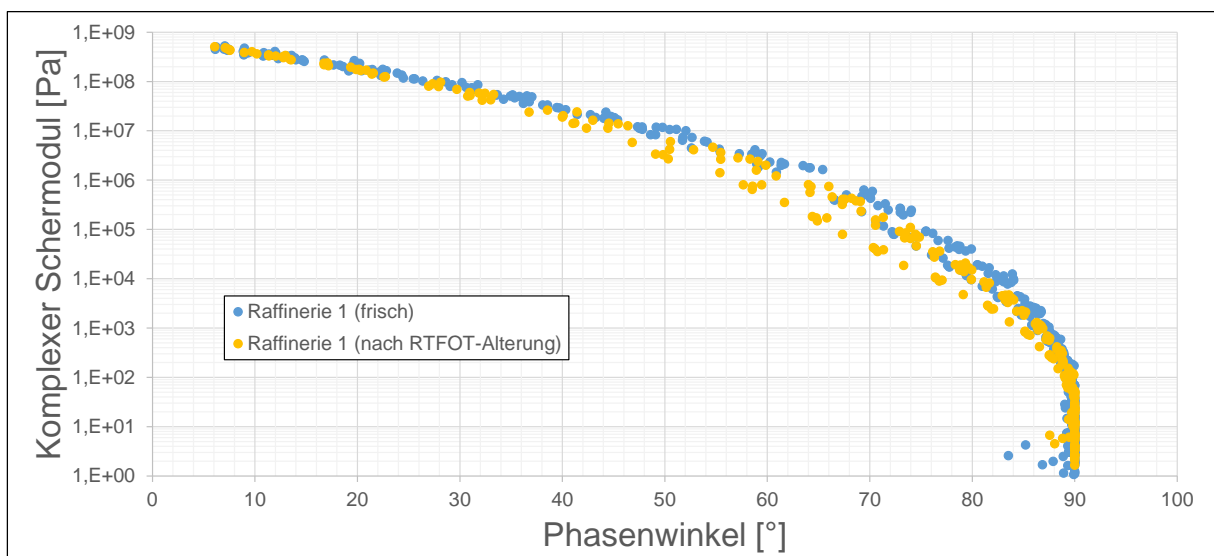


Bild 6-30: Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerie 1 im frischen und gealterten (RTFOT) Zustand

Neben der Steifigkeitszunahme bewirkt die RTFOT-Alterung eine grundsätzliche Änderung der Bitumenrheologie. Das Verhältnis zwischen komplexem Schermodul und Phasenwinkel wird deutlich beeinflusst. Bei gleicher Bitumensteifigkeit ist der elastische Verformungsanteil nach der Alterung größer. Die auf den komplexen Schermodul von 1 MPa bezogenen Phasenwinkel gehen weitestgehend unabhängig von der Bitumensteifigkeit und -provenienz im Mittel um etwa 8 ° zurück (Bild 6-30 und Bild 6-31). Inwieweit dies durch vorangegangene thermische Prozesse, wie beispielsweise durch das Anblasen der Bitumen, beeinflusst wurde, ist im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht untersucht worden.

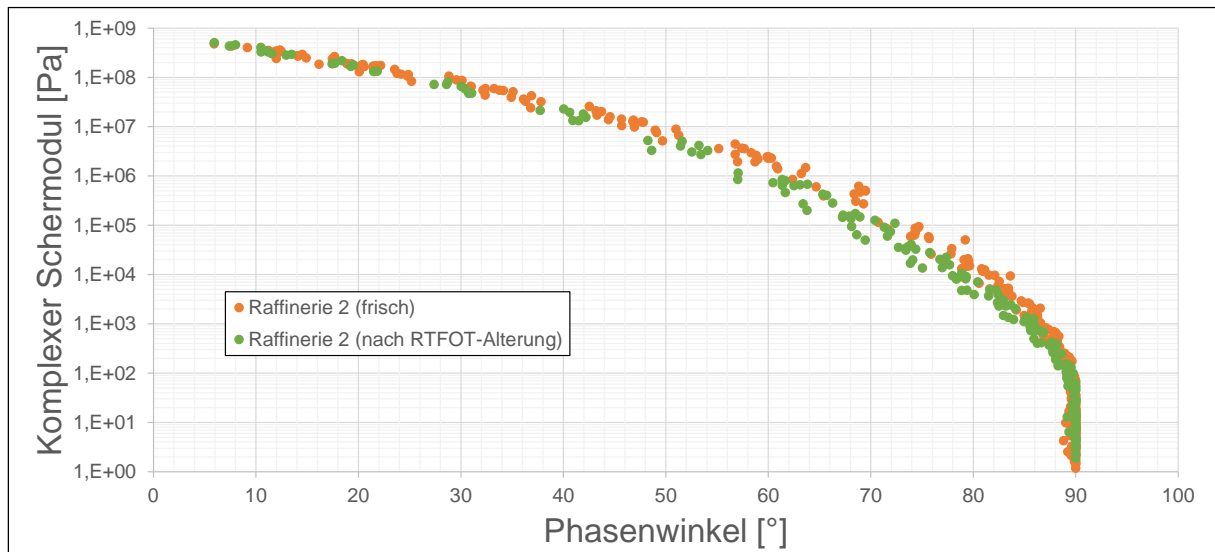


Bild 6-31: Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerie 1 im frischen und gealterten (RTFOT) Zustand

6.2 Haftverhalten

6.1.1 Rolling-Bottle-Test

In Bild 6-34 sind die Umhüllungsgrade nach 6, 24 und 48 h für die einzelnen Gesteine und Bitumensorten vergleichend dargestellt. Die größte Abnahme des Umhüllungsgrades ist beim Rhyolith, Diabas und Basalt zwischen der Ablesung nach 6 h und 24 h festzustellen. Bei der Grauwacke trat bei der Hälfte der untersuchten Proben die größte Veränderung nach 48 h auf. Für die weitere Analyse der Zusammenhänge wird dennoch der Wert nach 24 h herangezogen, da dieser in der Praxis nach dem ARS 11/2012 bei Erstprüfungen mit angegeben werden muss. Generell ist festzustellen, dass die ermittelten Umhüllungsgrade bei vielen (30 von 48 entspricht 63 %) Bitumen-Gesteins-Kombinationen nach 24 h unter 60 % liegen. Auch beim als haftunkritisch bekannten Diabas, welcher in der Praxis vielfach ein gutes Haftverhalten aufzeigte, ist dies festzustellen. Die im Labor geschätzten Umhüllungsgrade wurden aus diesem Grund zusätzlich durch eine fotooptische Auswertung überprüft. Fotooptische Aufnahmen wurden mit Hilfe des Bildverarbeitungstools „Image Processing Toolbox“ des Programms MATLAB® ausgewertet. Mit diesem Programm werden sogenannte „Cluster-Bilder“ erzeugt und der Gesteinskörnung, dem Bitumen und dem Hintergrund verschie-

denen Farbgruppen zugeteilt und der Anteil der einzelnen Farbgruppen durch das Programm ermittelt. In Bild 6-32 sind die Originalaufnahme (links) und das zugehörige Cluster-Bild (rechts) dargestellt.



Bild 6-32: Original-Bild rechts, „Cluster-Bild“ links - Grauwacke nach 24 h mit 6.R1 30/45 [Böhler, 2014]

Der Umhüllungsgrad berechnet sich wie folgt:

$$\text{Umhüllungsgrad} = \frac{\text{Farbgruppe der Gesteinskörnung [Pixel]}}{\text{Farbgruppe des verbliebenen Bitumens [Pixel]}}$$

Die Abweichungen zwischen der unabhängigen Bestimmung des Umhüllungsgrades mit MATLAB® und der visuellen Schätzung beträgt 0 bis maximal 10 %. In Bild 6-33 sind die beiden Umhüllungsgrade gegenübergestellt. Hierbei bestätigen sich die visuellen Auswertergebnisse.

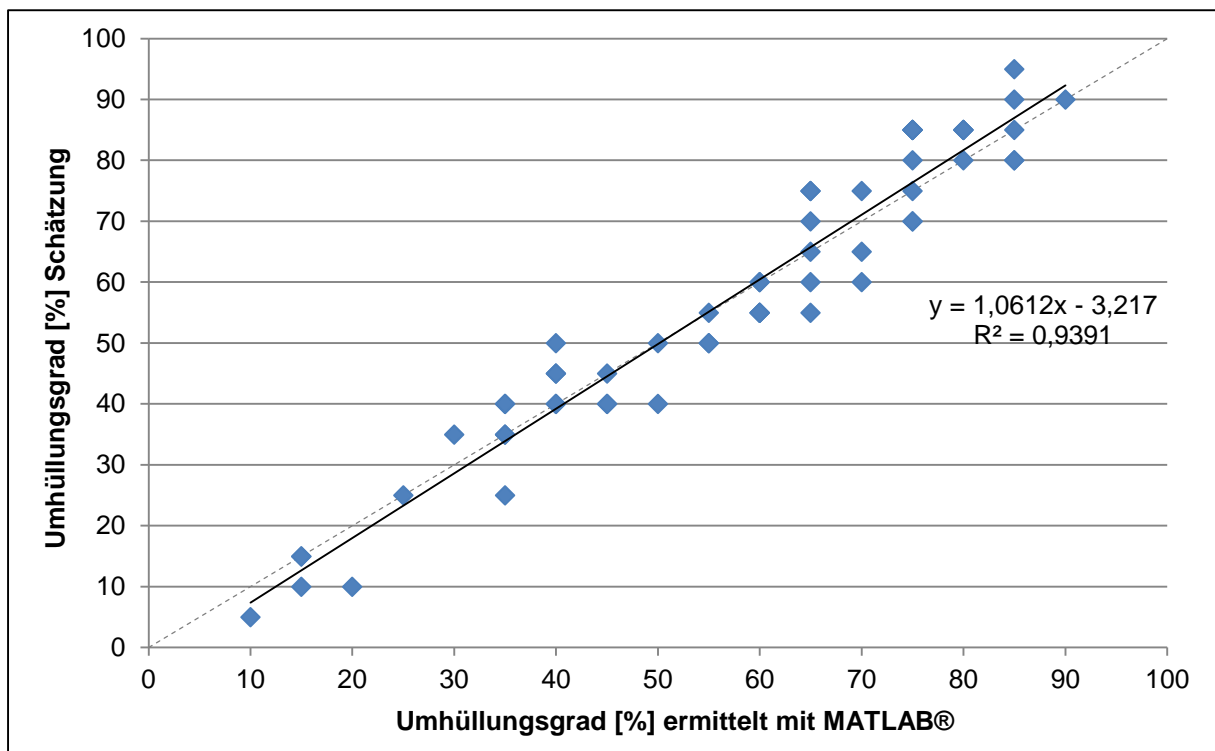


Bild 6-33: Korrelation der Mittelwerte der Ergebnisse der visuellen Schätzung und der Mittelwerte der Ergebnisse von MATLAB [Böhler, 2014]

Bestätigung finden die Ergebnisse zusätzlich im Forschungsprojekt FE 07.0209/2005/EGB [RENKEN et al., 2008], bei dem an verschiedenen Bitumen-Gesteins-Kombinationen (Basalt, Granit und Taunusquarzit mit drei verschiedenen Bitumen der Sorte 50/70) Umhüllungsgrade nach 24 h unter 60 % festgestellt wurden. Umhüllungsgrade ≥ 75 % wurden beim unmodifizierten Bitumen nur beim Kalkstein ermittelt. Auch [SCHMIDT, 2014] merkt an, dass der Anforderungswert von 60 % nach 24 h auch bei basischen Gesteinen mit einem bekanntermaßen guten Adhäsionsverhalten unterschritten wird.

Beim Rhyolith kommt es in vielen Fällen zu Verklumpungen der bitumenumhüllten Gesteinskörnungen, so dass die Ergebnisse nicht berücksichtigt werden können. Bei den anderen Gesteinen sind Verklumpungen bei den weicheren Bitumensorten 70/100 und 160/220 festzustellen.

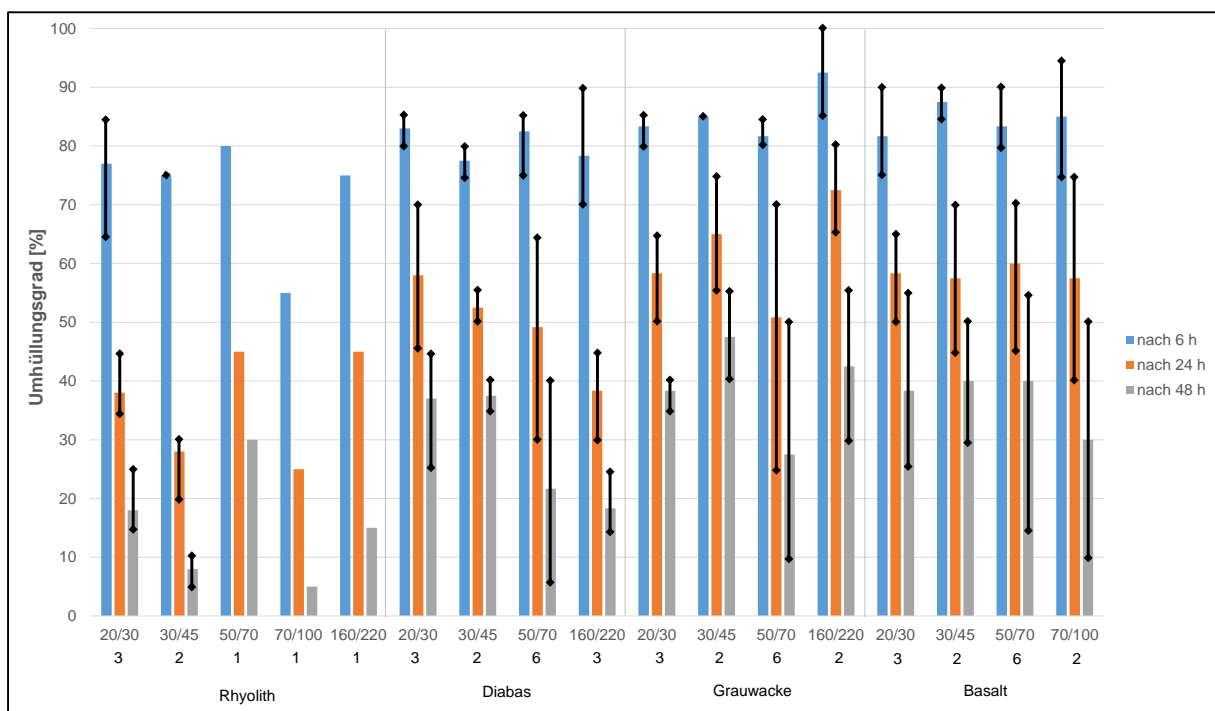


Bild 6-34: Umhüllungsgrade in Abhängigkeit von der Rolldauer und dem Gestein

In Bild 6-35 sind die Umhüllungsgrade nach 24 h im Vergleich zu der Porosität der Gesteine dargestellt. Das dichteste Gestein (Rhyolith) weist die geringsten Umhüllungsgrade auf. Diabas, Grauwacke und Basalt haben Umhüllungsgrade auf vergleichbarem Niveau trotz eines Unterschiedes in der Porosität von bis zu 1,4 %. Innerhalb der Gesteinsarten kommt es in Abhängigkeit von Bitumensorte und -provenienz zu Umhüllungsgraddifferenzen nach 24 h Rolldauer von ca. 30 % (Basalt) bis zu 55 % (Grauwacke). Beim Rhyolith könnte die Differenz von nur 25 % auch auf die geringere Anzahl zu verwertender Ergebnisse zurückgeführt werden.

In Bild 6-36 sind die Umhüllungsgrade dem Quarzanteil des jeweiligen Gesteins gegenübergestellt. Die Grauwacke besitzt trotz hohen Quarzanteils ein unerwartet gutes Haftverhalten im Vergleich zu den anderen Gesteinen. Dies könnte auf die vergleichsweise höhere Porosität des Gesteins zurückgeführt werden. Die Porosität begünstigt die Verzahnung von Bitumen und Gestein.

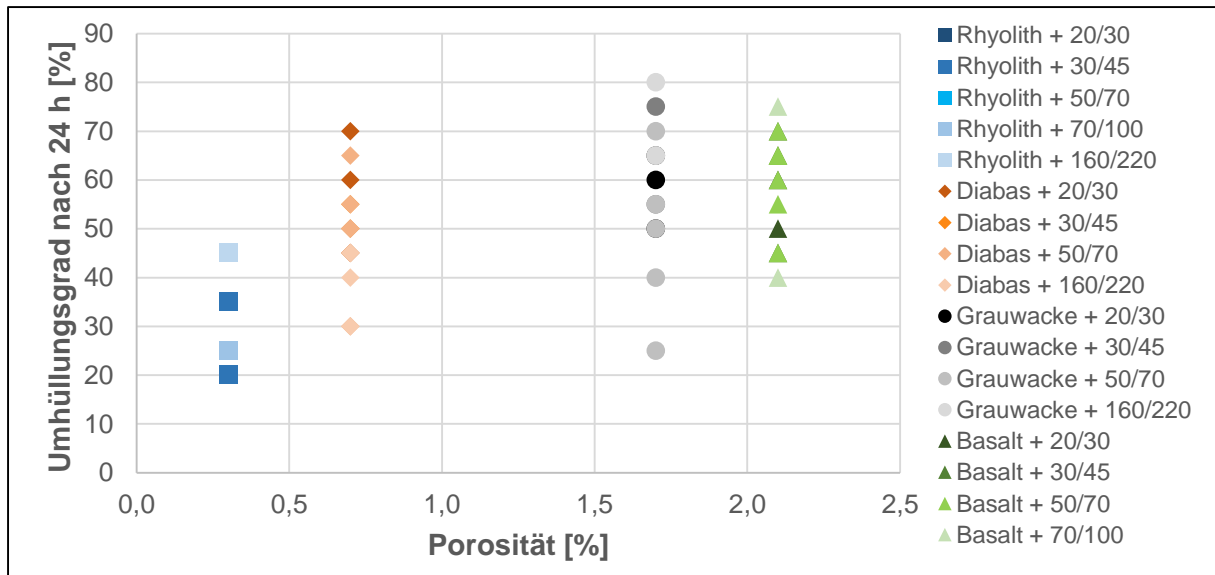


Bild 6-35: Umhüllungsgrade nach 24 h im Vergleich zur Porosität der Gesteine

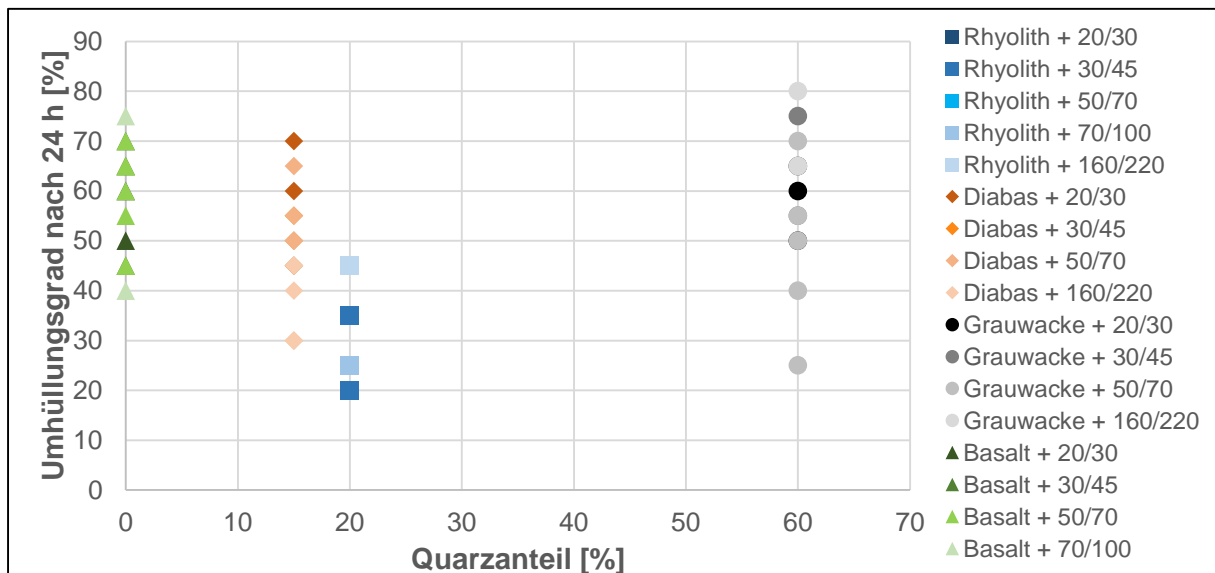


Bild 6-36: Umhüllungsgrade nach 24 h im Vergleich zum Quarzanteil der Gesteine

Zwischen dem Umhüllungsgrad nach 24 h und den in diesem Projekt bestimmten physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften des Bitumens konnten keine brauchbaren Zusammenhänge festgestellt werden. Dies gilt analog auch für die Umhüllungsgrade nach 6 und 48 h. Exemplarisch zeigen dies Bild 6-37 bis Bild 6-40.

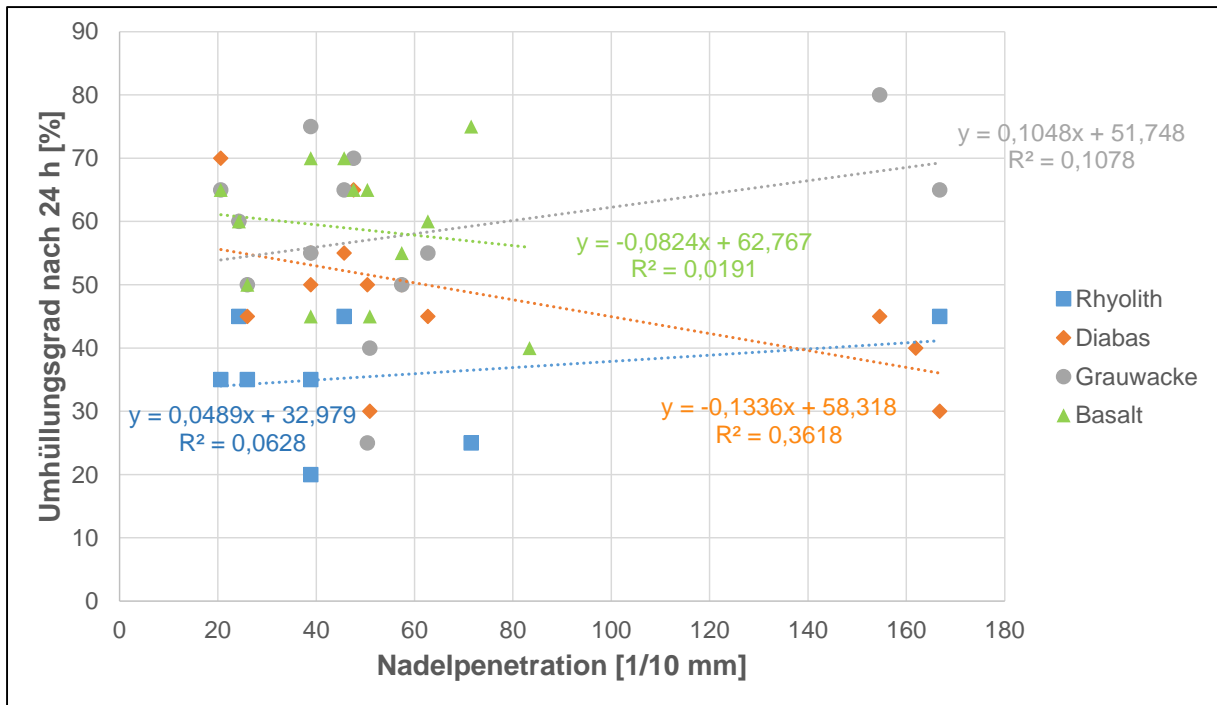


Bild 6-37: Zusammenhang zwischen der Nadelpenetration und dem Umhüllungsgrad nach 24 h

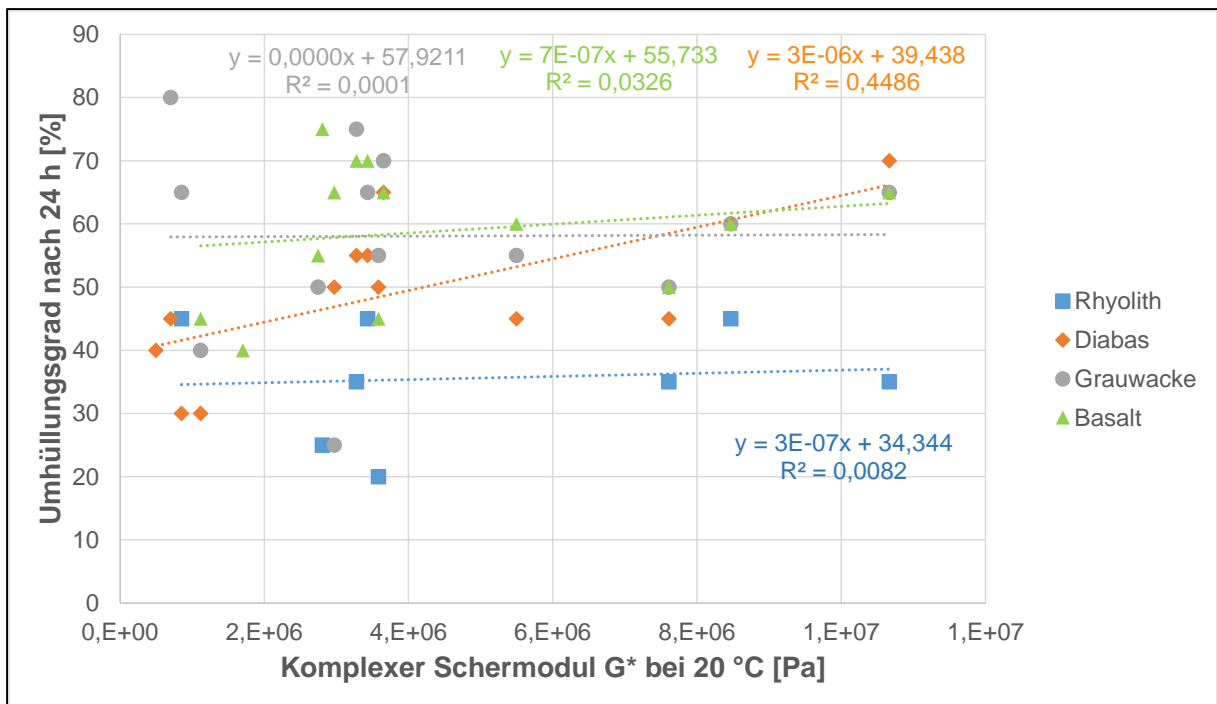


Bild 6-38: Zusammenhang zwischen dem komplexen Schermodul bei 20 °C und dem Umhüllungsgrad nach 24 h

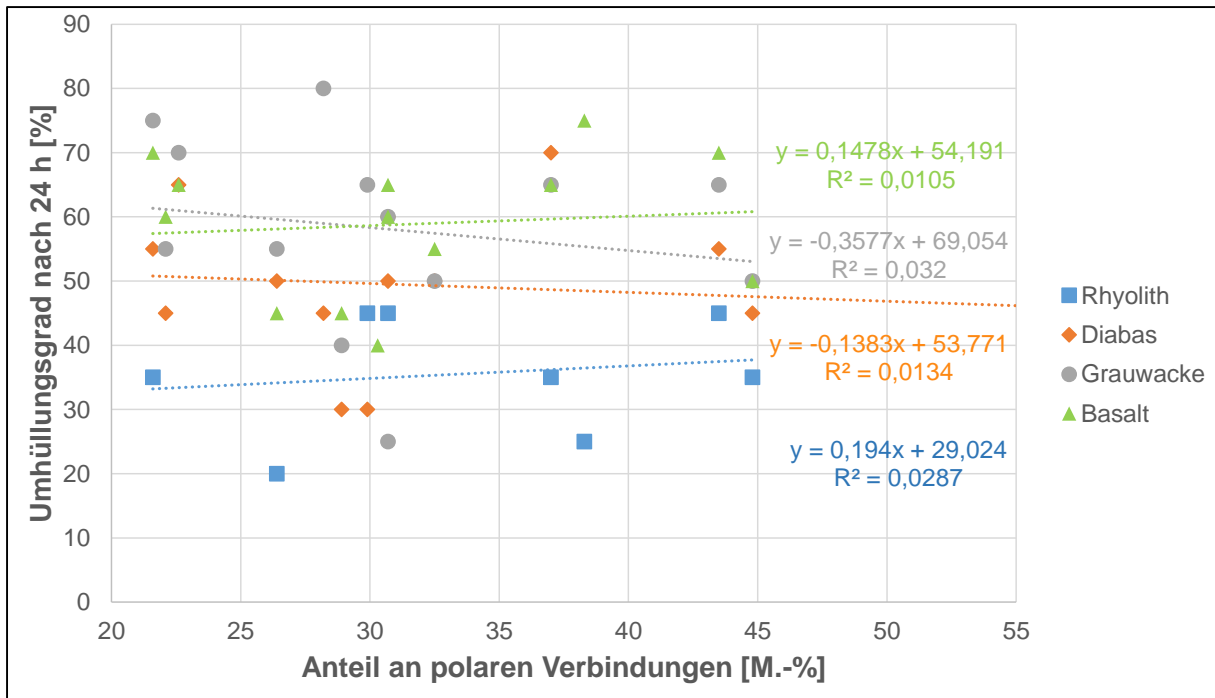


Bild 6-39: Zusammenhang zwischen dem Anteil der polaren Verbindungen und dem Umhüllungsgrad nach 24 h

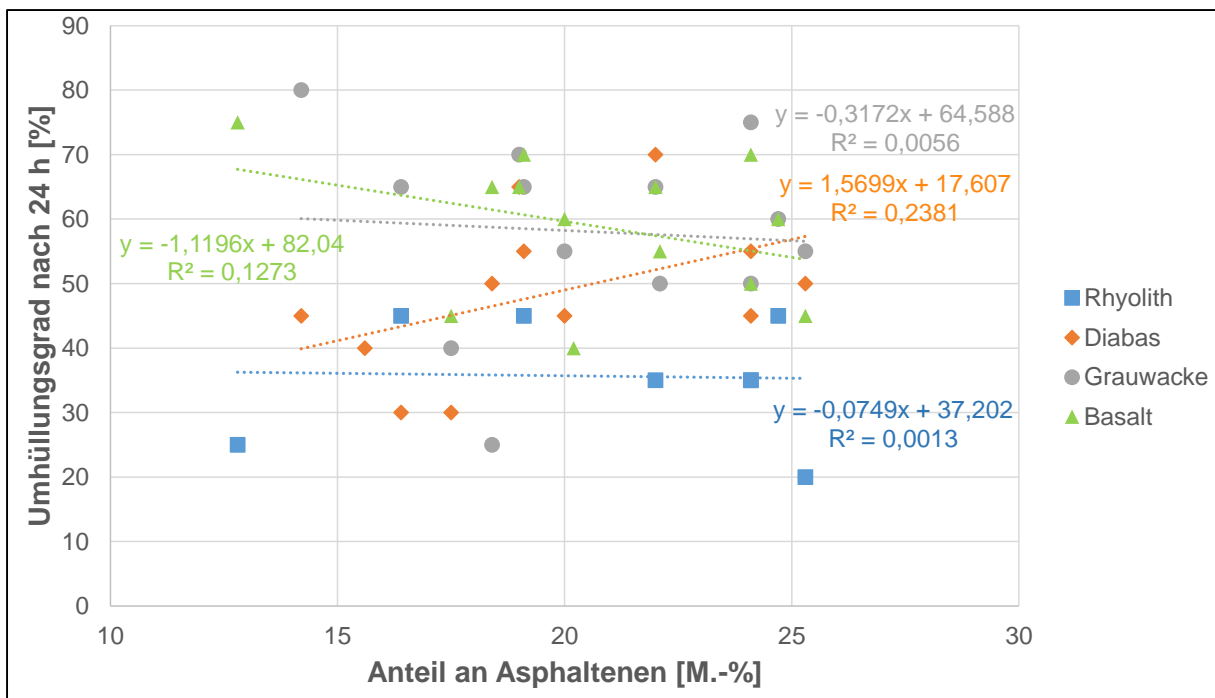


Bild 6-40: Zusammenhang zwischen dem Anteil der Asphaltene und dem Umhüllungsgrad nach 24 h

Die Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung des Bitumens und dem Umhüllungsgrad nach 24 h können auch durch eine Multiple-Lineare-Regression, bei der die Viskosität der verschiedenen Bitumen durch den komplexen Schermodul bei 20 °C berücksichtigt wird, nicht verbessert werden. In Bild 6-41 ist der Unterschied zwischen den berechneten und den im Labor bestimmten Werten - für die einzelnen Gesteine getrennt betrachtet - exemplarisch für den Anteil der Polaren Verbindungen im Bitumen dargestellt.

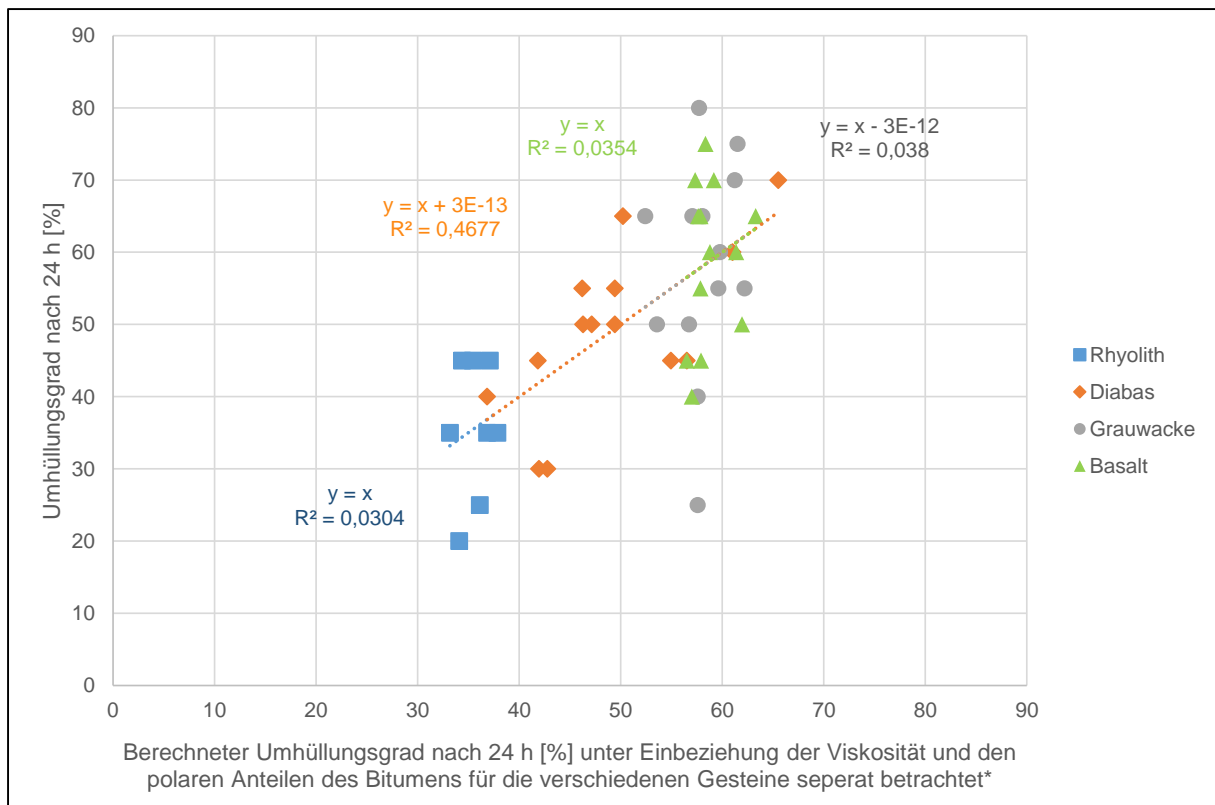


Bild 6-41: Zusammenhang zwischen dem Umhüllungsgrad und dem Anteil der polaren Verbindungen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Viskosität der Bitumen
*Die Gleichungen, die der Berechnung zugrunde liegen, sind dem Text zu entnehmen.

Die Bild 6-41 zugrunde liegenden Gleichungen lauten wie folgt:

$$\text{Rhyolith: } U = 0,18 \times P + 1,22 \times 10^{-7} \times G^* + 28,92 \quad (\text{Gl. 6-7}) \quad R^2 = 0,03$$

$$\text{Diabas: } U = -0,17 \times P + 2,52 \times 10^{-6} \times G^* + 44,73 \quad (\text{Gl. 6-8}) \quad R^2 = 0,47$$

$$\text{Grauwacke: } U = -0,42 \times P + 4,01 \times 10^{-7} \times G^* + 69,20 \quad (\text{Gl. 6-9}) \quad R^2 = 0,04$$

$$\text{Basalt: } U = 0,08 \times P + 6,42 \times 10^{-7} \times G^* + 53,50 \quad (\text{Gl. 6-10}) \quad R^2 = 0,04$$

Mit U = Umhüllungsgrad nach 24 h [%]; P = Anteil der polaren Verbindungen [M.-%]
 G^* = Komplexer Schermodul bei 20 °C [Pa]

Zur abschließenden Überprüfung wurden alle in diesem Projekt ermittelten chemischen Kennwerte des Bitumens, der komplexe Schermodul und die Gesteinseigenschaften bei der Multiplen-Linearen-Regression berücksichtigt. Der Umhüllungsgrad berechnet sich demnach wie folgt:

$$U = 1,39 \times 10^{-6} \times G^* + 72,88 \times A_s + 72,76 \times P + 72,00 \times A_r + 74,87 \times A_l - 3,28 \times P_a + 11,36 \times P_o + 0,02 \times Q - 7233,58 \quad (\text{Gl. 6-11}) \quad R^2 = 0,52$$

Mit U = Umhüllungsgrad nach 24 h [%]; G^* = Komplexer Schermodul bei 20 °C [Pa]

A_s = Anteil der Asphaltene [M.-%], P = Anteil der polaren Verbindungen [M.-%]

A_r = Anteil der Aromaten [M.-%], A_l = Anteil der Aliphaten [M.-%]

P_a = Anteil der Paraffine [M.-%], P_o = Porosität der Gesteine [%]

Q = Quarzanteil [M.-%]

Die Gleichung entspricht den Angaben in der Literatur dahingehend, dass Bitumen mit einer höheren Viskosität, d.h. höherem komplexen Schermodul, ein besseres Adhäsionsverhalten besitzen, da dieser Wert mit einem positiven Vorfaktor eingeht und der

Umhüllungsgrad mit einem höheren komplexen Schermodul ansteigt. Gleiches gilt für die Porosität der Gesteine. Eine höhere Porosität führt zu einem höheren Umhüllungsgrad. Aufgrund dessen, dass die Stoffgruppen im Bitumen mit ähnlichen Vorfaktoren in der Gleichung berücksichtigt werden, könnte davon ausgegangen werden, dass sie für die Multiple-Lineare-Regression nicht von Bedeutung sind, werden sie weggelassen, verringert sich das Bestimmtheitsmaß jedoch auf 0,36. Ein höherer Paraffingehalt wirkt sich wie erwartet negativ auf den Umhüllungsgrad aus.

6.1.2 Schüttelabriebversuch

In Bild 6-42 und Bild 6-43 sind die Abhängigkeiten zwischen den Ergebnissen der Schüttelabriebversuche und den Porositäten bzw. den Quarzanteilen der Gesteine dargestellt. Bei diesem Prüfverfahren ist der Einfluss der beiden Gesteinseigenschaften gering. In Abhängigkeit vom Bitumen ergeben sich Unterschiede im Abrieb von 56 % beim Rhyolith, 57 % beim Diabas, 70 % bei der Grauwanke und 74 % beim Basalt.

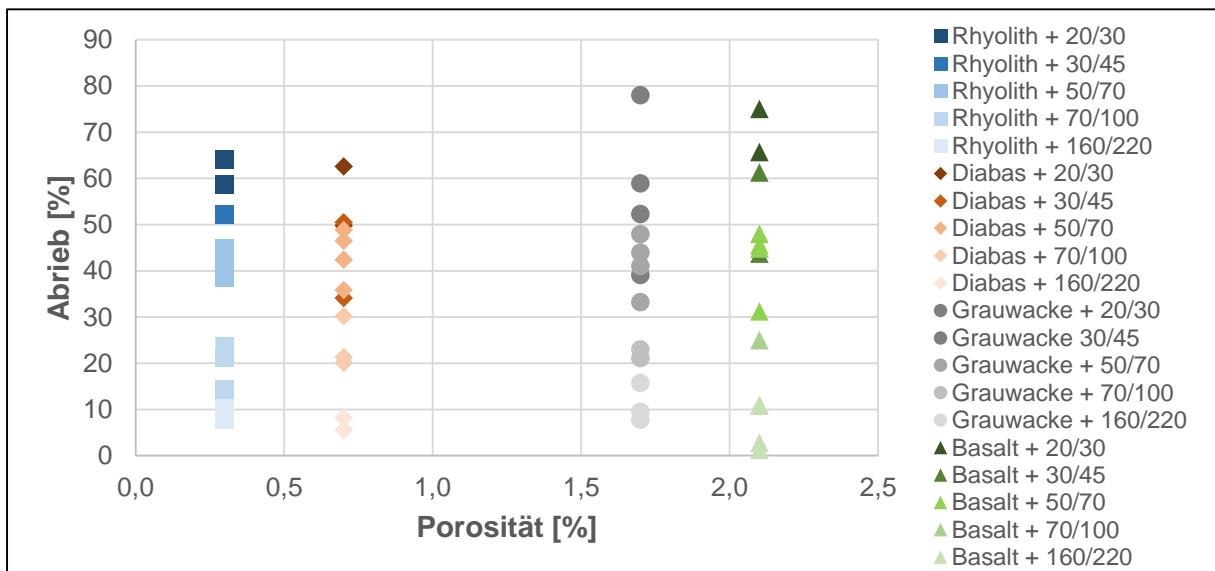


Bild 6-42: Abrieb im Vergleich zur Porosität der Gesteine

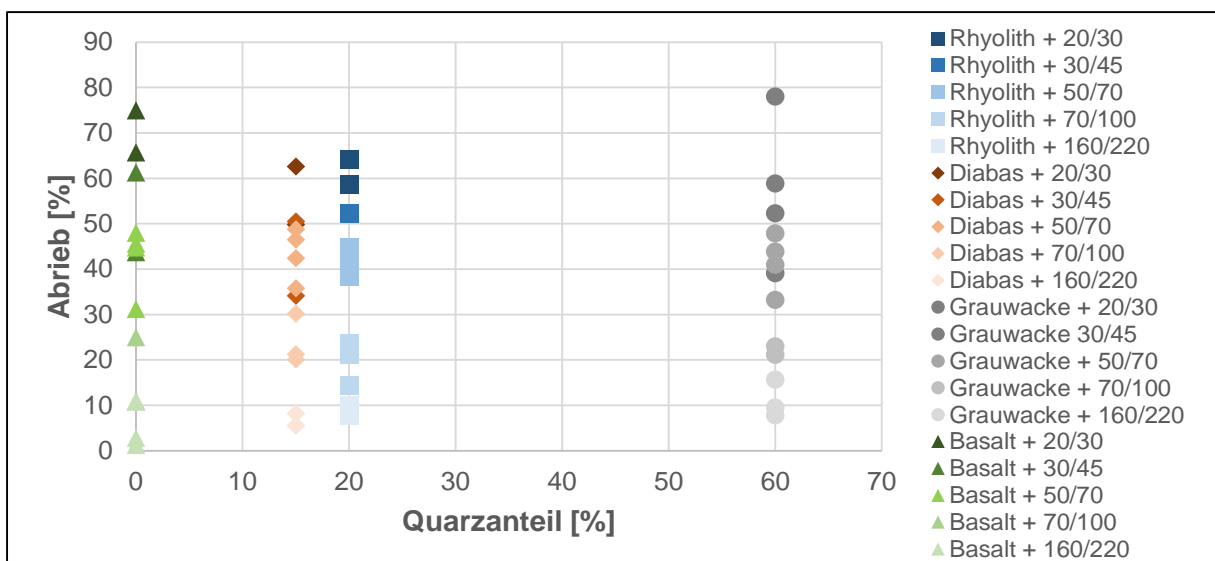


Bild 6-43: Abrieb im Vergleich zum Quarzanteil der Gesteine

In Bild 6-44 sind die Abriebergebnisse aller Bitumen und Gesteine vergleichend dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Ergebnisse von der Härte des Bitumens abhängig sind. Der Abrieb ist bei den weichen Bitumen geringer als bei harten Bitumen. Als Ergebnis der Literaturrecherche wurde festgehalten, dass viskosere Bitumen sich schwerer von Wasser verdrängen lassen. Dies kann mit den hier vorliegenden Ergebnissen nicht bestätigt werden. Möglicherweise werden die im Schüttelabriebversuch auftretenden mechanischen Kräfte von weicheren Bindemitteln gedämpft.

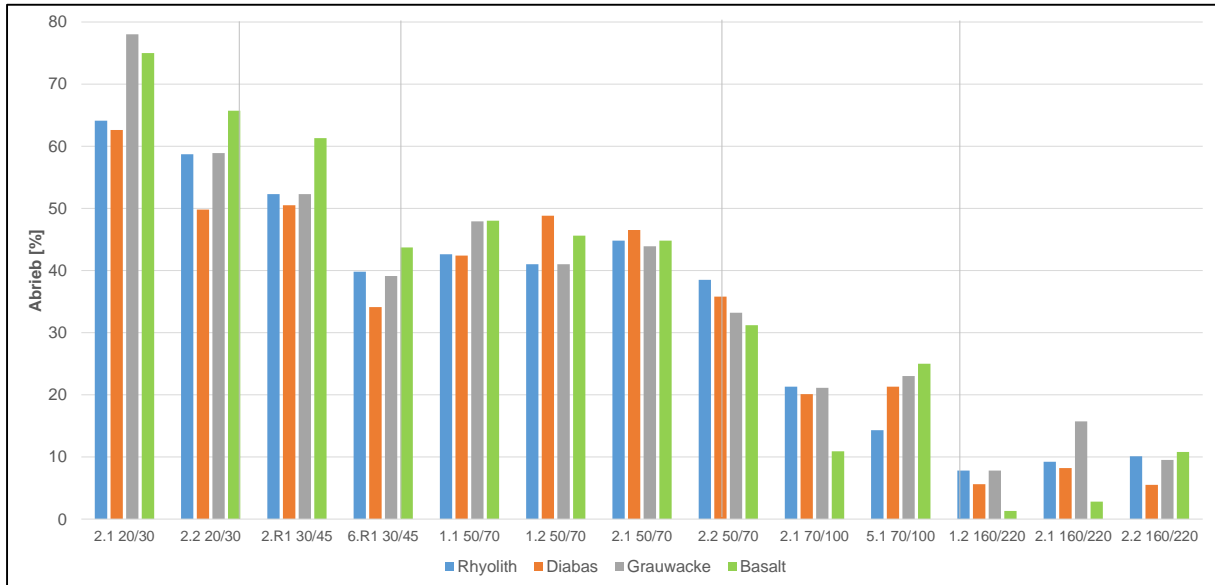


Bild 6-44: Vergleichende Darstellung der Abriebergebnisse aller Bitumen und Gesteine

Der Einfluss der Härte des Bitumens wird auch durch den Zusammenhang zwischen dem Abrieb und den physikalischen Eigenschaften wie dem Erweichungspunkt Ring und Kugel, der Nadelpenetration, dem komplexen Schermodul und dem Phasenwinkel ersichtlich. Exemplarisch ist dies Bild 6-45 und Bild 6-46 zu entnehmen.

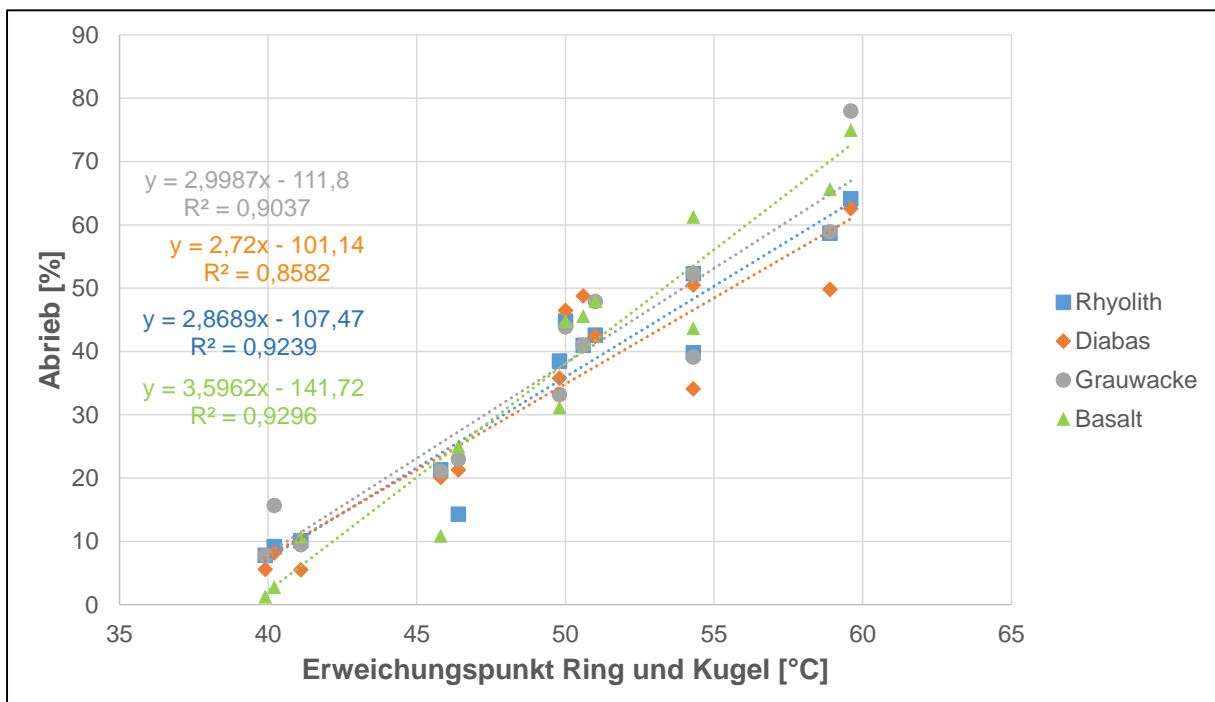


Bild 6-45: Zusammenhang zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und dem Abrieb

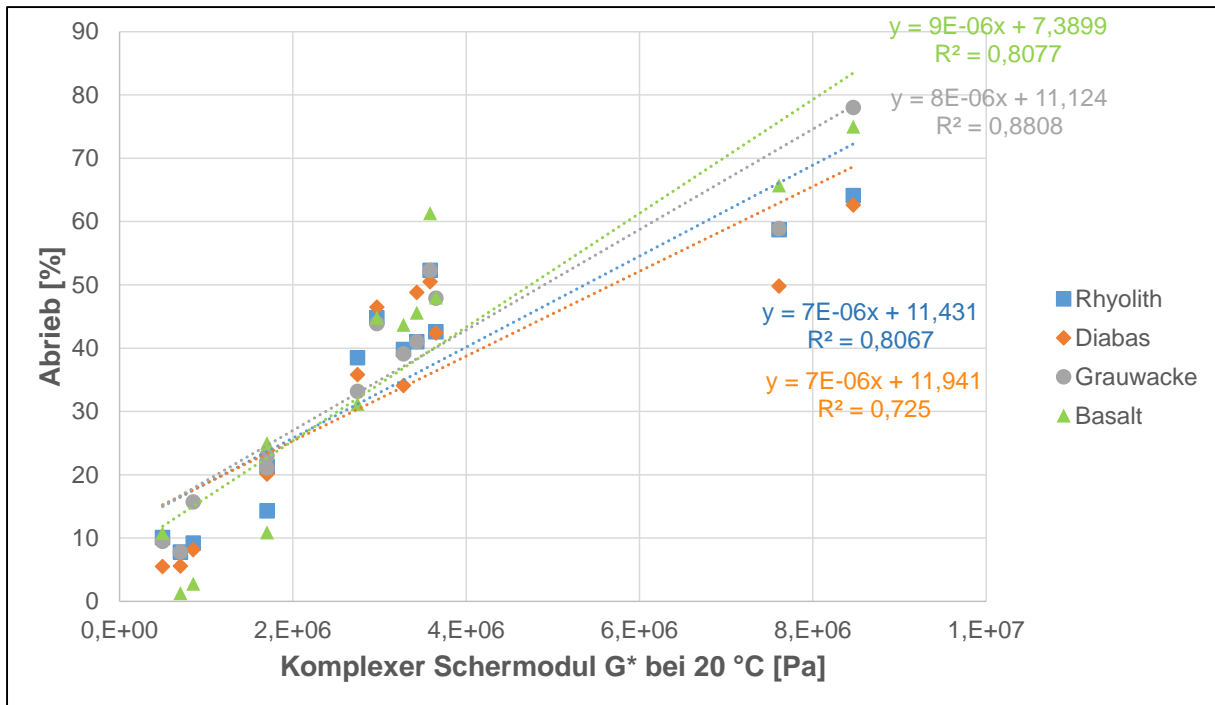


Bild 6-46: Zusammenhang zwischen dem komplexen Schermodul bei 20 °C und dem Abrieb

Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung kann ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem Asphaltengehalt und dem Abrieb festgestellt werden (Bild 6-47). Dies bestätigt erneut den Einfluss der Bitumenhärte, da der Asphaltengehalt grundsätzlich auch die Härte des Bitumens bestimmt. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der weiteren, in diesem Projekt ermittelten chemischen Zusammensetzung der Bitumen und den Ergebnissen des Schüttelabriebversuches konnte nicht festgestellt werden.

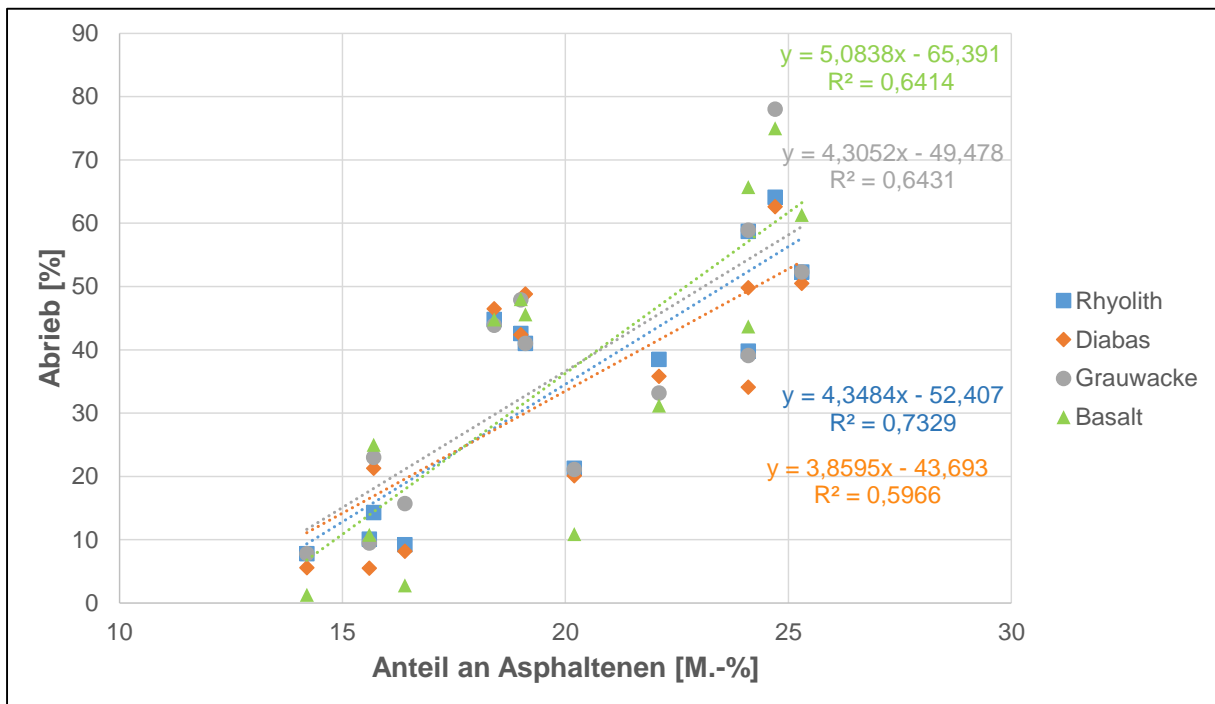


Bild 6-47: Zusammenhang zwischen dem Anteil der Asphaltene und dem Abrieb

Der Abrieb berechnet sich unter Berücksichtigung des komplexen Schermoduls, der chemischen Zusammensetzung und den Gesteinseigenschaften, Porosität und Quarzanteil, nach der Multiplen-Linearen-Regression wie folgt:

$$A = 5,57 \times 10^{-6} G^* - 6,02 \times As - 7,10 \times P - 7,34 \times Ar - 7,63 \times Al - 10,86 \times Pa + 0,96 \times Po + 0,02 \times Q + 729,40 \quad (\text{Gl. 6-12}) \quad R^2 = 0,87$$

Mit A = Abrieb [%]; G^* = Komplexer Schermodul bei 20 °C [Pa]
 As = Anteil der Asphaltene [M.-%], P = Anteil der polaren Verbindungen [M.-%]
 Ar = Anteil der Aromaten [M.-%], Al = Anteil der Aliphaten [M.-%]
 Pa = Anteil der Paraffine [M.-%], Po = Porosität der Gesteine [%]
 Q = Quarzanteil [M.-%]

Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,87. Somit ist ein Zusammenhang zwischen den Kennwerten und den Ergebnissen der Schüttelabriebprüfung gegeben. Einen großen Einfluss hat der komplexe Schermodul, wird nur der komplexe Schermodul mit den Abribergebnissen unabhängig von der Gesteinsart betrachtet, ergibt sich bereits ein Bestimmtheitsmaß von 0,79 (Bild 6-48), dieses kann durch die weiteren Kennwerte verbessert werden. Entsprechend den Aussagen der Literaturrecherche verringert sich der Abrieb bei zunehmendem Anteil der polaren Verbindungen und der Aromaten, jedoch entgegen den bisherigen Erkenntnissen verringert sich der Abrieb mit zunehmenden Anteil an Paraffinen.

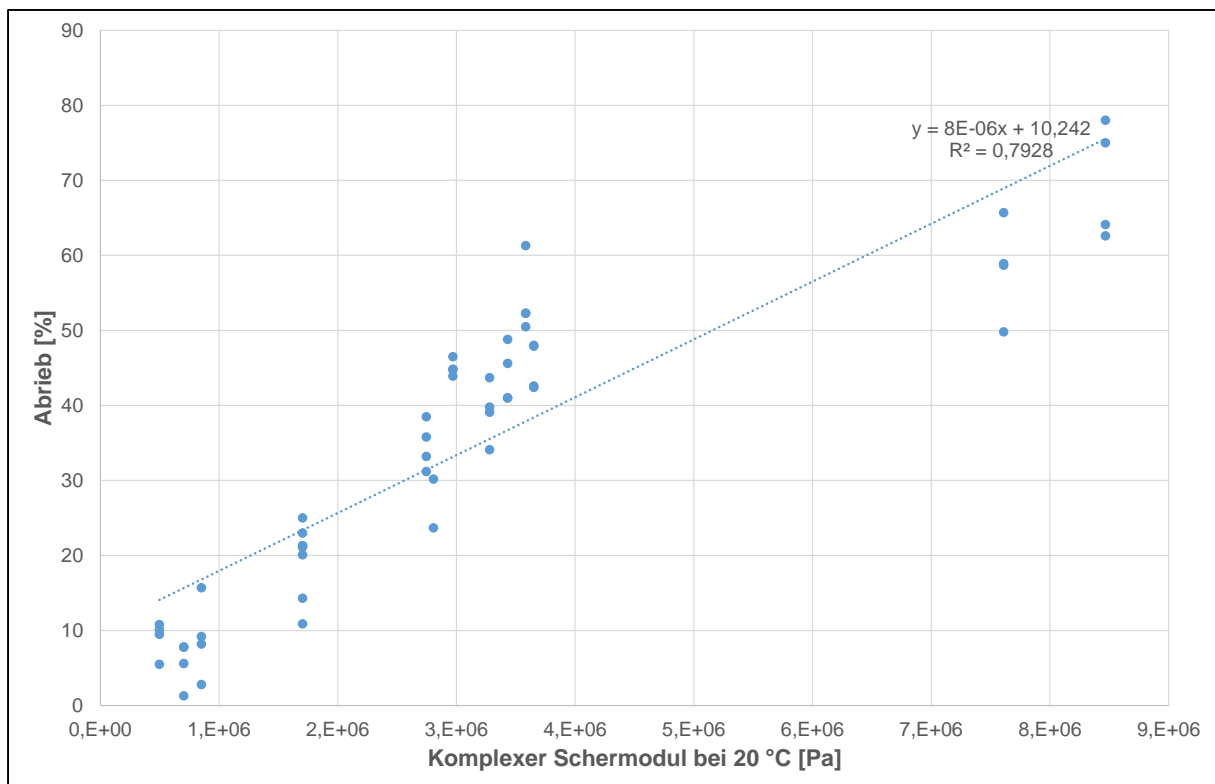


Bild 6-48: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Schüttelabriebprüfung und dem komplexen Schermodul bei 20 °C

6.1.3 Bestimmung der Wasserempfindlichkeit

In Bild 6-49 sind die ITSR-Werte der ausgewählten Bitumen mit den Gesteinen Rhyolith und Basalt vergleichend dargestellt.

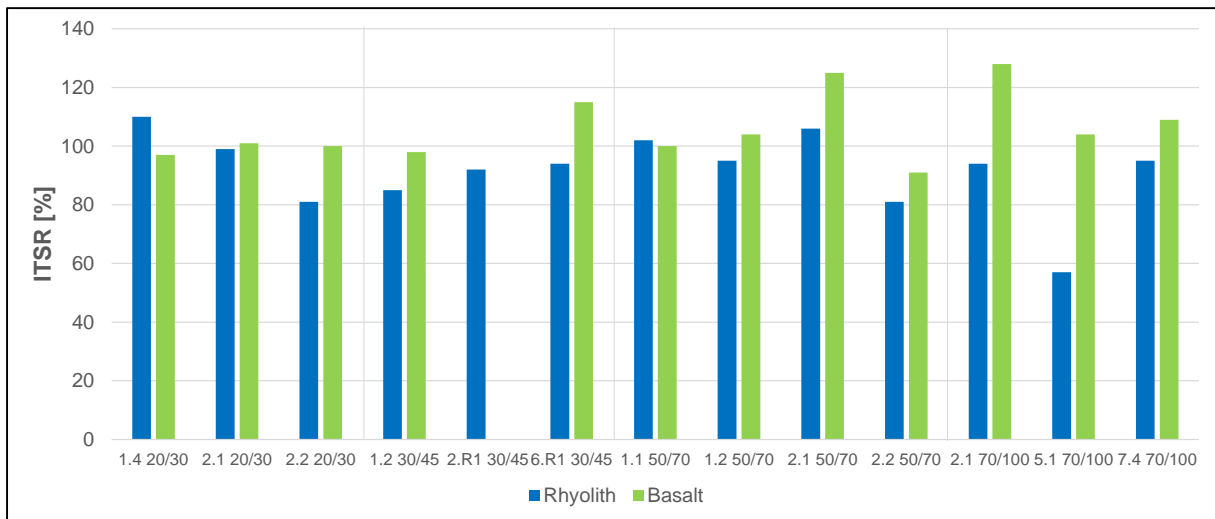


Bild 6-49: Vergleichende Darstellung der ITSR-Werte aller Bitumen mit Rhyolith und Basalt

Die Asphaltgemische mit Basalt zeigen eine etwas geringere Wasserempfindlichkeit als die mit Rhyolith. Auffällig ist hier das Ergebnis der Variante Rhyolith mit 5.1 70/100, die eine deutlich höhere Wasserempfindlichkeit zeigt, als die anderen Varianten. Dieses Ergebnis kann bei den dynamischen Versuchen nicht bestätigt werden (siehe Bild 6-52). Ein Zusammenhang zwischen den ITSR-Werten und den physikalischen und chemischen Eigenschaften der verschiedenen Bitumen konnte nicht festgestellt werden. Dies zeigt exemplarisch der Zusammenhang zwischen den ITSR-Werten und dem komplexen Schermodul (Bild 6-50) bzw. dem Anteil an polaren Verbindungen (Bild 6-51).

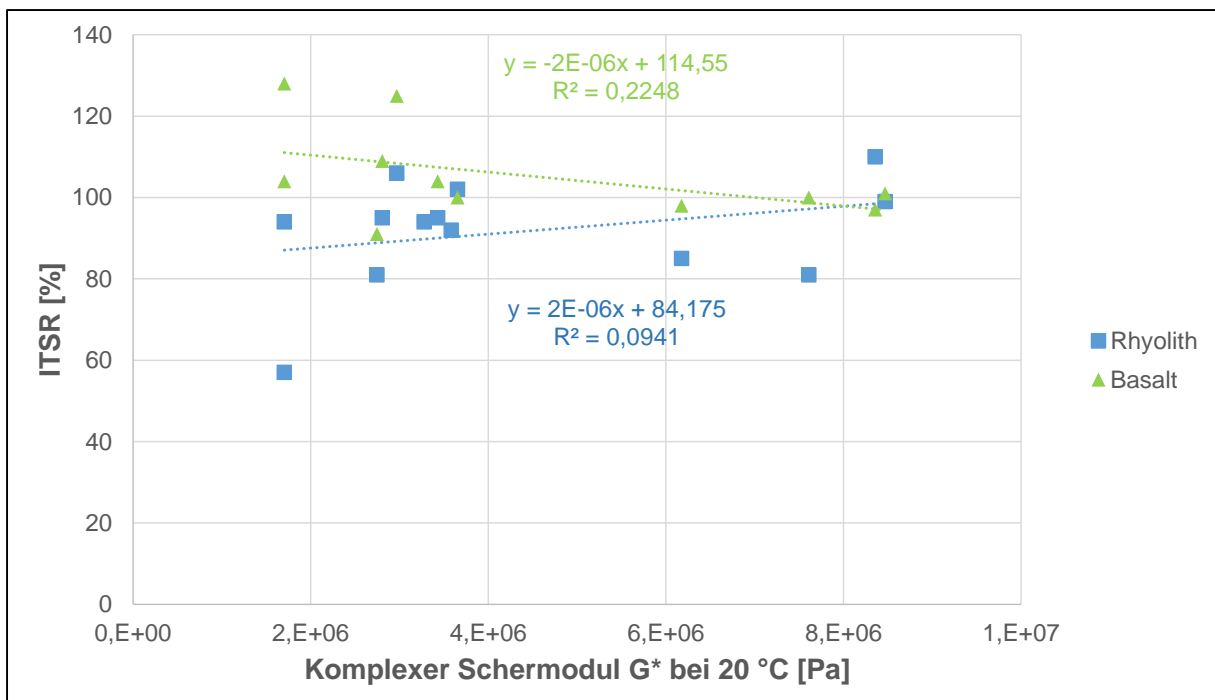


Bild 6-50: Zusammenhang zwischen den ITSR-Werten und dem komplexen Schermodul bei 20 °C

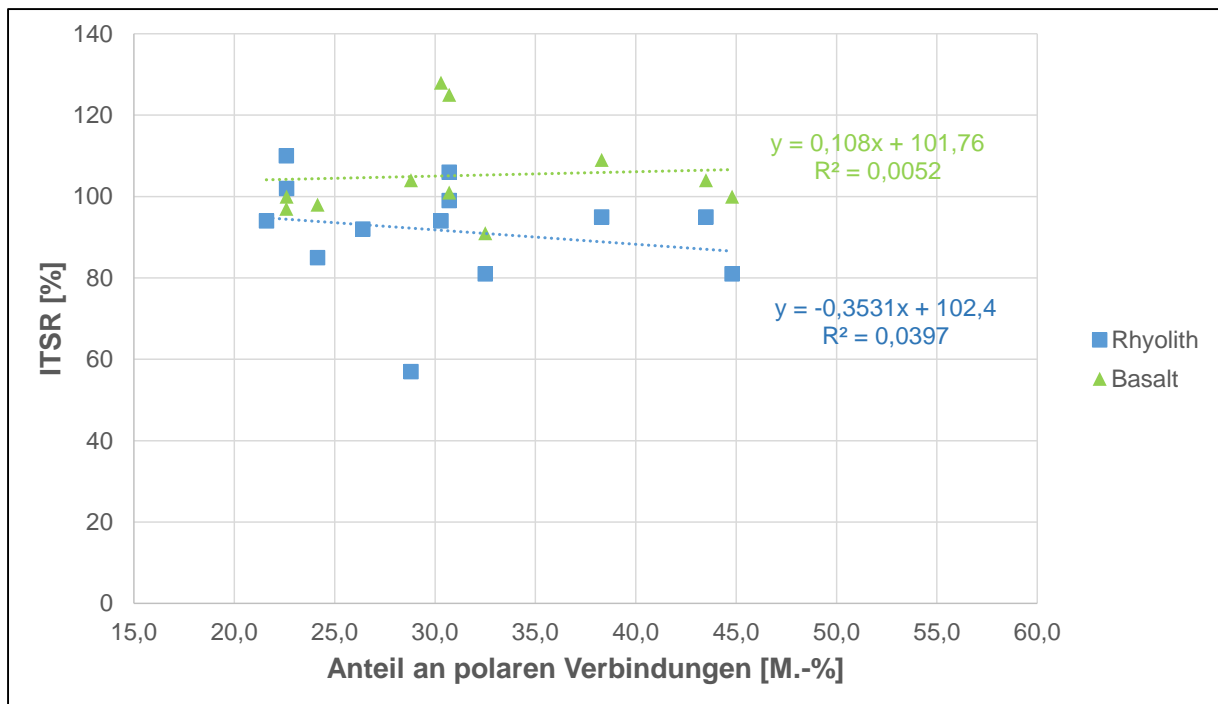


Bild 6-51: Zusammenhang zwischen den ITSR-Werten und dem Anteil an polaren Verbindungen

Die Multiple-Lineare-Regression mit Berücksichtigung des komplexen Schermoduls, der chemischen Zusammensetzung der Bitumen, der Porosität und dem Quarzanteil der Gesteine ergab keinen brauchbaren Zusammenhang ($R^2 = 0,33$).

In Bild 6-52 sind die Verhältnisse der Lastwechselzahl N_{makro} vor und nach Wasserlagerung der verschiedenen Varianten gegenübergestellt. Vielfach wurde hierbei eine „Verbesserung“ des Ermüdungsverhaltens nach Wasserlagerung festgestellt. Möglicherweise ist die Zeitdauer zwischen der Probenherstellung und der Prüfung oder der Porenwasserdruck beeinflussender als die Wasserlagerung

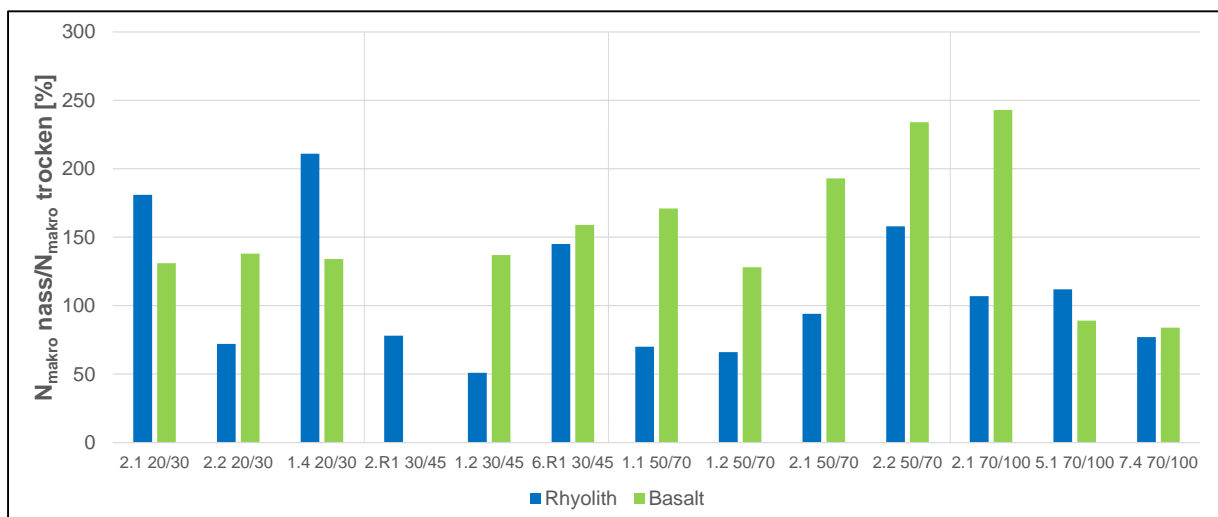


Bild 6-52: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der Ermüdungslastwechselzahl vor und nach Wasserlagerung der ausgewählten Bitumen für Rhyolith und Basalt

Auch bei diesem Prüfverfahren kann kein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und den physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften des Bitumens quantifiziert werden.

6.1.4 Kontaktwinkelmessungen

Bei Betrachtung der Oberflächenspannungen der Gesteine (Tab. 5-12) fällt auf, dass diese vergleichbar sind. Der Rhyolith hat mit 62 mN/m eine etwas höhere Oberflächenspannung als der Basalt und die Grauwacke. Die Grauwacke weist die geringsten polaren Anteile auf, während die Anteile vom Basalt und Rhyolith auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Mit Hilfe der polaren Anteile kann das bessere Adhäsionsverhalten des Basaltes im Vergleich zum Rhyolith somit nicht begründet werden. Die höhere Oberflächenspannung des Rhyoliths könnte eine Begründung für dessen schlechteres Adhäsionsverhalten darstellen.

In Bild 6-53 sind die Oberflächenspannungen der verschiedenen Bitumen gegenübergestellt. Die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Oberflächenspannung beträgt 2,06 mN/m, somit liegen alle Ergebnisse auf einem Niveau und auf eine weitere Analyse der Einflüsse auf die Oberflächenspannung wurde verzichtet.

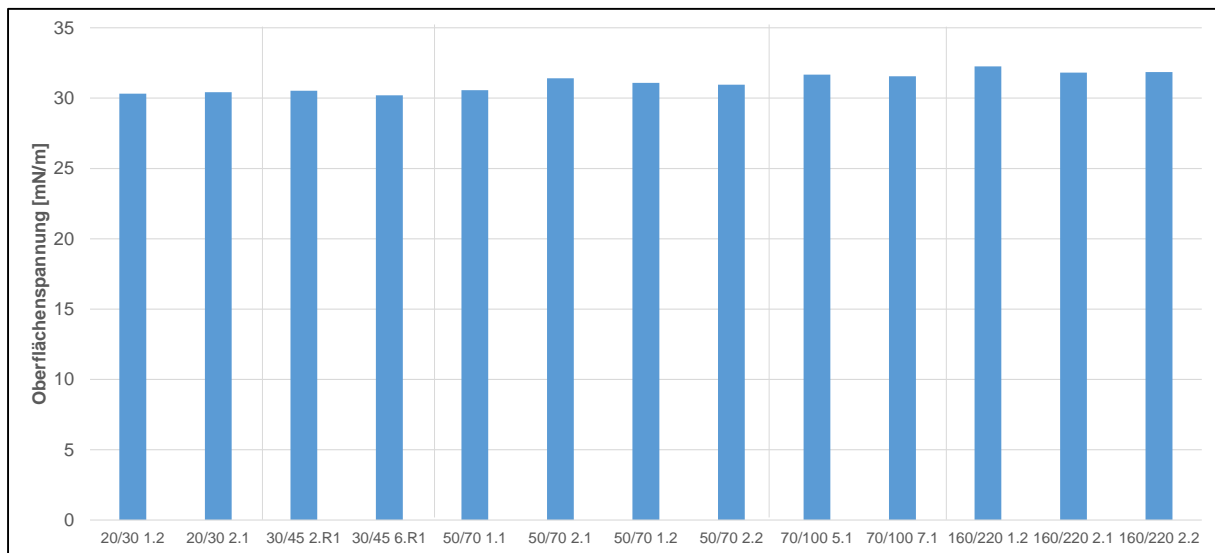


Bild 6-53: Vergleichende Darstellung der Oberflächenspannungen der ausgewählten Bitumen

In Bild 6-54 ist das unterschiedliche Spreitverhalten der ausgewählten Bitumen auf Rhyolith, Grauwacke und Diabas dargestellt. Trotz Prüfung bei Äquiviskositätstemperatur und vergleichbarer Oberflächenspannung der Bitumen sind Unterschiede im Spreitverhalten in Abhängigkeit vom Bitumen festzustellen. Diese Unterschiede können jedoch nicht auf einfache Zusammenhänge mit der chemischen Zusammensetzung des Bitumens zurückgeführt werden (exemplarische Darstellung für den Anteil an polaren Verbindungen Bild 6-55). Eine Abhängigkeit vom Gestein lässt sich ebenfalls nicht erkennen.

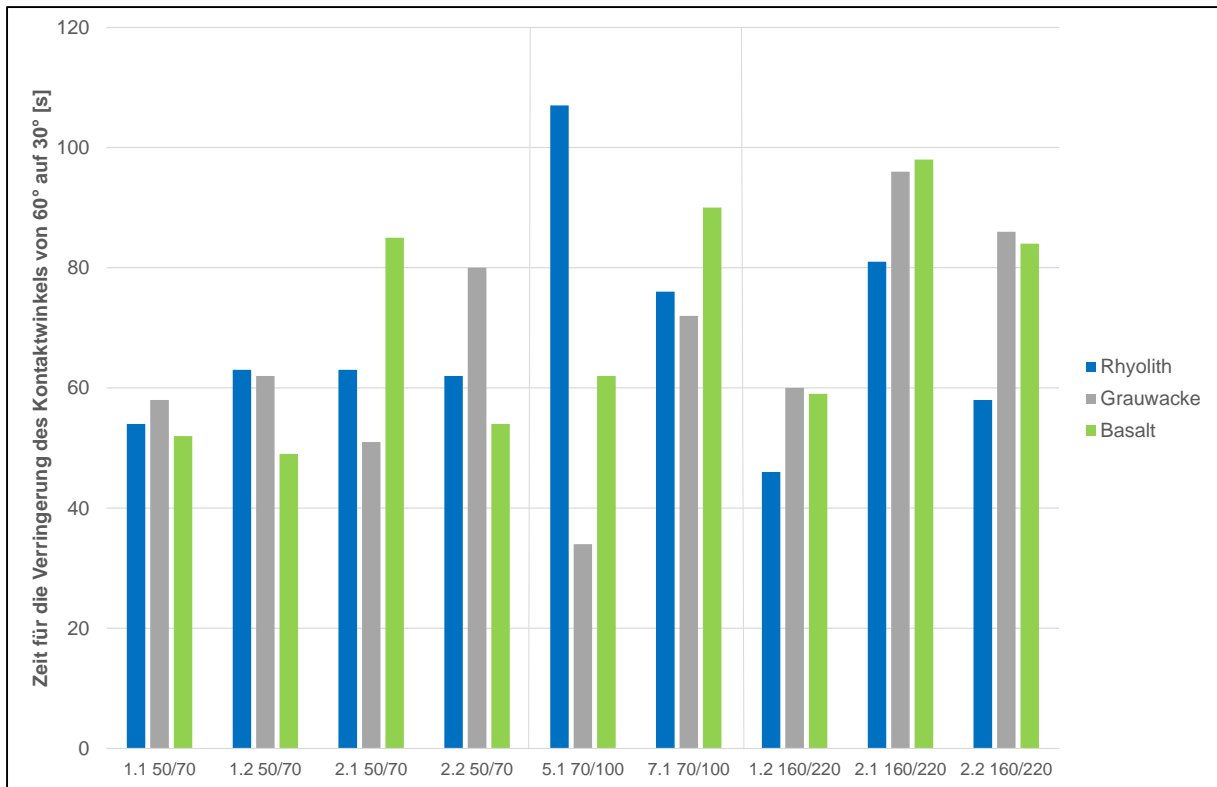


Bild 6-54: Vergleichende Darstellung des unterschiedlichen Spreitverhaltens der ausgewählten Bitumen auf Rhyolith, Grauwacke und Basalt

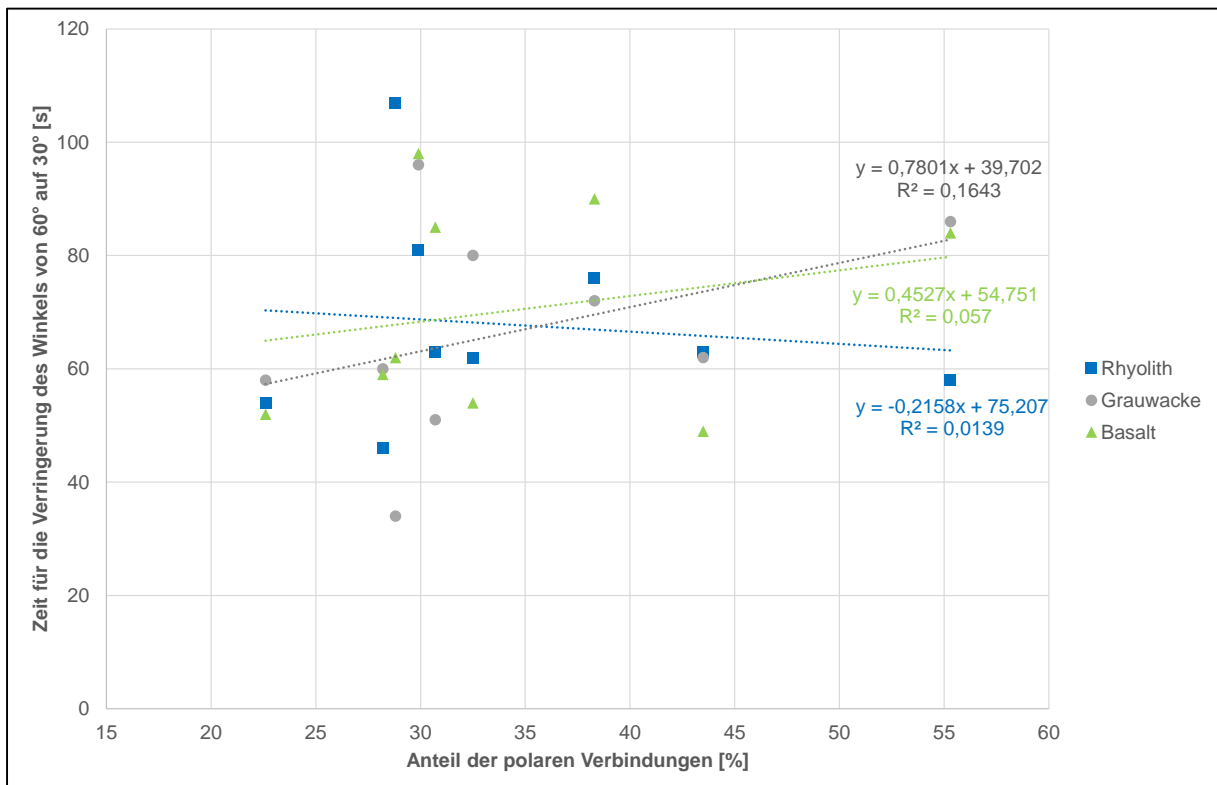


Bild 6-55: Zusammenhang zwischen dem Anteil der polaren Verbindungen und dem Spreitverhalten der verschiedenen Bitumen in Abhängigkeit vom Gestein

6.1.5 Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren

Die Betrachtung der einzelnen Prüfverfahren lässt auf keine Zusammenhänge zwischen den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bitumens und dem Adhäsionsverhalten schließen. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle die verschiedenen Ergebnisse für die Gesteine Basalt und Rhyolith verglichen, um gegebenenfalls Bitumen zu ermitteln, die in allen Versuchen ein gutes oder schlechtes Adhäsionsverhalten zeigen. Da der Schüttelabriebversuch nachweislich von der Härte des Bitumens abhängig ist, werden die Ergebnisse mit folgender Formel normiert:

$$A_n = \frac{A}{G_{20\text{ °C}}^*} \cdot 100.000$$

mit: A_n Abrieb „normiert“
 A Abrieb
 $G_{20\text{ °C}}^*$ Komplexer Schermodul bei 20 °C

In Tab. 6-1 sind die Ergebnisse der hier verwendeten Prüfverfahren für die verschiedenen Varianten vergleichend dargestellt.

Tab. 6-1: Vergleich der Varianten bei den Prüfverfahren zur Bewertung der Wasserempfindlichkeit, dem Schüttelabriebversuch und dem Rolling-Bottle-Test

Gestein	Bitumen	Verhältnis N _{makro} Nass/ N _{makro} Trocken [%]	ITSR [%]	Abrieb "normiert" [%]	Umhüllungsgrad nach 24 h [%]
Rhyolith	2.1 20/30	181	101	0,76	zu geringe Datenmenge aufgrund von Verklumpungen
	2.2 20/30	72	100	0,77	
	6.R1 30/45	145	115	1,21	
	1.1 50/70	70	100	1,17	
	1.2 50/70	66	104	1,19	
	2.1 50/70	94	125	1,51	
	2.2 50/70	158	91	1,40	
	2.1 70/100	107	128	1,25	
	5.1 70/100	112	104	0,84	
Basalt	2.1 20/30	131	99	0,89	60
	2.2 20/30	138	81	0,86	50
	6.R1 30/45	159	94	1,33	70
	1.1 50/70	171	102	1,31	65
	1.2 50/70	128	95	1,33	70
	2.1 50/70	193	106	1,51	65
	2.2 50/70	234	81	1,14	55
	2.1 70/100	243	94	0,64	40
	5.1 70/100	89	57	1,47	75

Die Tabelle veranschaulicht, dass die verschiedenen Prüfverfahren zu keinem einheitlichen Ranking der verschiedenen Bitumen-Gestein-Kombinationen führen und sich zum Teil widersprechen.

6.1.6 Einfluss der Polymermodifizierung

Der Einfluss der Polymermodifizierung auf den Umhüllungsgrad beim Rhyolith ist für die verschiedenen Polymere vergleichend in Bild 6-56 dargestellt. Die höchsten Umhüllungsgrade nach 6 h weisen das Elastomer B (80 %) und das Plastomer C (85 %) auf. Nach 24 h sind die Umhüllungsgrade insgesamt drastisch niedriger. Außerdem ist die Spreizung der Ergebnisse und damit die Aussagekraft größer. Nach 24 h und auch nach 48 h erreichen die Mischungen mit dem Plastomer B und C die höchsten Umhüllungsgrade. In Bild 6-57 sind die Veränderungen des Umhüllungsgrades nach 24 h der verschiedenen polymermodifizierten Bitumen im Vergleich zum Bitumen 2.1 50/70 für die Gesteine Basalt, Grauwacke und Diabas gegenübergestellt. Hier zeigt sich, dass der Einfluss der Modifizierung stark vom Gestein abhängig ist. Einen nennenswerten Einfluss auf das Adhäsionsverhalten haben die Modifizierungen nur bei der Grauwacke. Beim Basalt und beim Diabas sind keine signifikanten Veränderungen beobachtet worden. Unabhängig vom Gestein hat die Modifizierung mit dem Plastomer A die geringste Veränderung der Ergebnisse im Rolling-Bottle-Test ergeben.

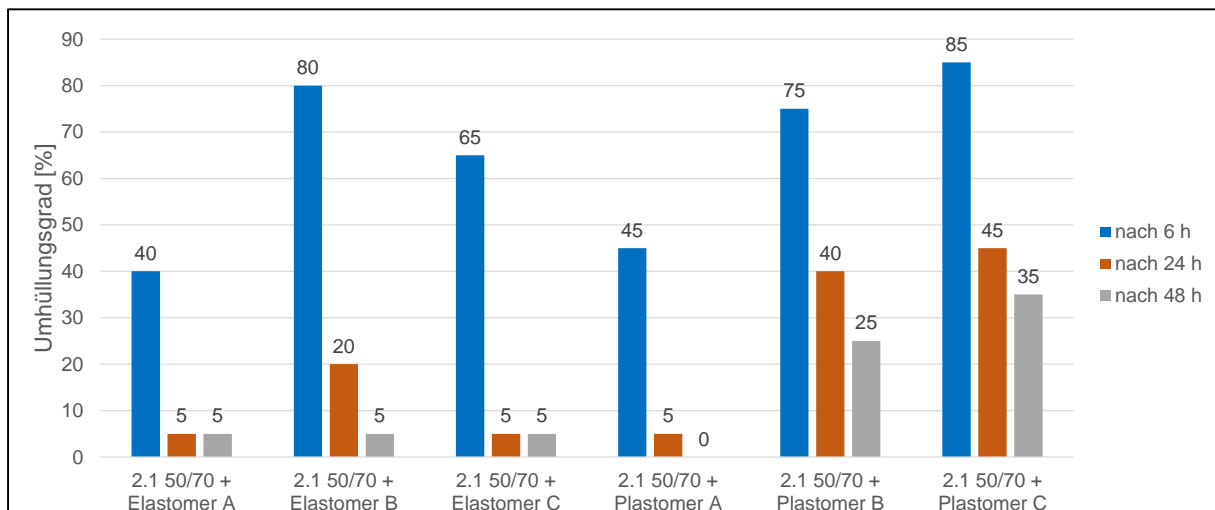


Bild 6-56: Umhüllungsgrade der verschiedenen PmB bei Rhyolith nach 6, 24 und 48 h

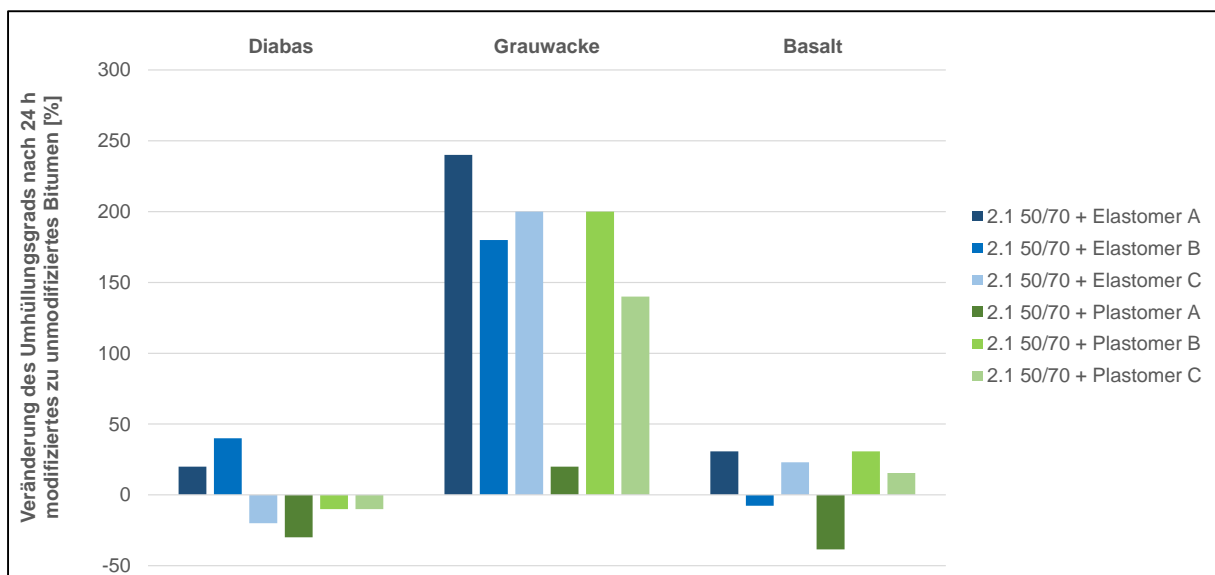


Bild 6-57: Einfluss der Polymermodifizierung auf den Umhüllungsgrad nach 24 h bei Diabas, Grauwacke und Basalt

Die Ergebnisse der Schüttelabriebversuche sind in Bild 6-58 vergleichend dargestellt. Der Einfluss der Bitumenhärte ist auch bei diesen Versuchen wieder festzustellen. Die modifizierten Bitumen mit höherer Nadelpenetration und somit geringerer Härte (2.1 50/70 + Plastomer B und C) führen zu einem geringeren Abrieb. Trotz einer insgesamt steigenden Härte durch die Modifizierung zeigt sich, abgesehen von dem Elastomer A beim Basalt, eine Verbesserung des Abriebverhaltens.

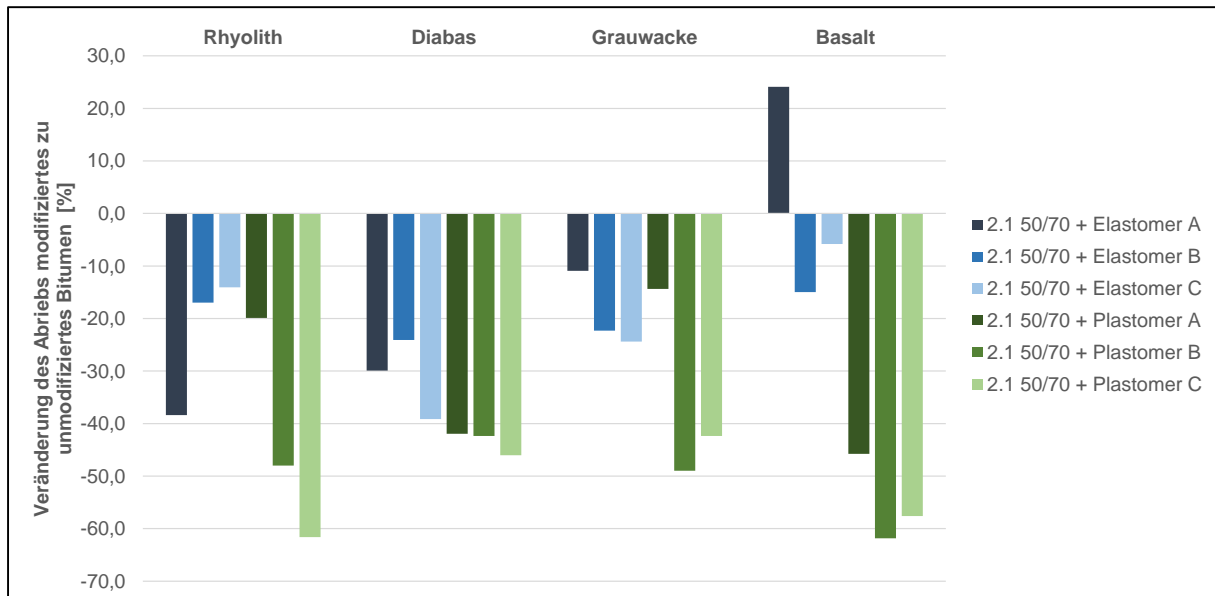


Bild 6-58: Einfluss der Polymermodifizierung auf den Abrieb bei Diabas, Grauwacke und Basalt

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsprojekt wurden durch eine umfassende Analyse von 90 Straßenbaubitumen zunächst die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung untersucht. Im Anschluss daran wurde mit ausgewählten Bitumen der Einfluss der physikalischen Eigenschaften bzw. der chemischen Zusammensetzung auf das Adhäsionsverhalten bei verschiedenen Gesteinskörnungen näher analysiert.

Die Analyse des Kälteverhaltens mit den genormten Prüfverfahren liefert bereits bei Straßenbaubitumen keine einheitliche Bewertung. Die tendenziell vergleichbaren, jedoch im Detail deutlich abweichenden Bewertungen anhand der Brechpunkte nach Fraaß oder anhand der BBR-Ergebnisse verdeutlichen, dass die derzeitigen Analysen des Kälteverhaltens noch Verbesserungspotenzial aufweisen.

Bei den untersuchten Straßenbaubitumen weisen die mittels DSR bestimmten rheologischen Kennwerte und die Ergebnisse der BBR-Messungen einen direkten Zusammenhang auf. Gute Korrelationen liefern die DSR-Kennwerte darüber hinaus zu den Ergebnissen der Versuche in den weiteren Temperaturbereichen, also der Nadelpenetration und dem Erweichungspunkt Ring und Kugel. In Form einer Äquiviskositätstemperatur (Temperatur, bei der der komplexe Schermodul 15 kPa beträgt) ist mit dem DSR eine Kenngröße zu bestimmen, die bei Straßenbaubitumen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel mit hoher Präzision entspricht.

Alle untersuchten Straßenbaubitumen weisen eine vergleichbare Temperaturabhängigkeit auf, wobei mit zunehmender Bitumenhärte eine tendenziell größere Plastizitätsspanne festgestellt wurde. Durch eine Polymermodifizierung werden die Bitumeneigenschaften dagegen entscheidend verändert. Die DSR-Ergebnisse zeigen eine grundlegende Veränderung der Bitumenrheologie und eine deutliche Reduzierung der Temperaturabhängigkeit. Bei zusätzlicher Bestimmung des Kraft-Duktilitäts-Verhaltens werden darüber hinaus Unterschiede zwischen den verwendeten Elastomeren und Plastomeren festgestellt: während ein Plastomer die Bitumen versteift und die beiden anderen Plastomere offensichtlich stabile Netzwerke ausbilden (Erhöhung der Formänderungsarbeit), erhöhen die Elastomere sowohl die Steifigkeit als auch die Elastizität.

Während die Verteilung der Aliphaten, Aromaten und polaren Verbindungen in der Gruppe der Maltene keinen feststellbaren Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften der Bitumen ausübt, beeinflusst der Asphaltengehalt die Bitumensteifigkeit maßgeblich. Mit zunehmendem Asphaltengehalt nimmt die Bitumensteifigkeit kontinuierlich zu. Dieser Einfluss nimmt mit zunehmender Temperatur und der damit verbundenen Viskositätsabnahme zu.

Die Straßenbaubitumen wurden neben dem frischen Zustand auch nach einer thermisch-oxidativen Kurzzeitalterung (RTFOT-Verfahren) untersucht. Neben der bekannten Steifigkeitserhöhung ist nach der Alterung eine signifikante Veränderung der Bitumenrheologie festzustellen. Der steifigkeitsabhängige Phasenwinkel wird deutlich

reduziert. Bei einer im Black-Diagramm charakteristischen Steifigkeit von 1 MPa beträgt der Rückgang durch die RTFOT-Alterung im Mittel etwa 8 %. Ein relevanter Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung der Frischbitumen und der Kurzzeitalterung wurde dagegen nicht festgestellt. Langzeitalterungsversuche an ausgewählten Bitumen könnten hier hilfreich sein.

Bei den hier durchgeführten Adhäsionsversuchen konnte ein grundsätzlicher, aber kein systematischer Einfluss der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Bitumen auf das Adhäsionsverhalten festgestellt werden. Dennoch zeigen die Versuche, dass verschiedene Bitumen und Gesteine eine große Einflussnahme auf das Adhäsionsverhalten ausüben.

Der Schüttelabriebversuch hat sich bei den hier verwendeten Randbedingungen als ungeeignet für ein Adhäsionsprüfverfahren erwiesen, da der maßgebliche Faktor für den Abrieb die Viskosität ist. Um den Einfluss der Viskosität zu minimieren, können die Versuche bei Äquiviskositätstemperatur durchgeführt werden, jedoch zeigen die Probenkörper einen so starken Abrieb, dass hier der mechanische Einfluss als zu stark angesehen wird.

Bei den anderen Prüfverfahren ist ein unterschiedliches Haftverhalten der Bitumen und Gesteine festzustellen, allerdings zeigen die Versuche kein einheitliches Ranking der verschiedenen Bitumen-Gestein-Kombinationen. Mit den hier bestimmten Kennwerten konnten bei keinem der Prüfverfahren die maßgeblichen Einflussfaktoren genauer quantifiziert werden. Gegebenenfalls können andere Kennwerte wie die Säurezahl des Bitumens, der Anteil von Nickel und Vanadium im Bitumen oder das Zeta-Potential der Gesteine weiterhelfen. Die große in diesem Projekt gewonnene Datenmenge sollte um weitere Bitumen- und Gesteinskennwerte erweitert werden, so dass mit Hilfe einer Multivarianzanalyse die Einflussfaktoren quantifiziert werden können.

Weiterhin zeigt sich die Notwendigkeit, den Adhäsionsversuchen tiefergehende Bedeutung beizumessen und neue Prüfverfahren zu entwickeln bzw. die Randbedingungen bestehender Verfahren anzupassen, so dass diese unabhängig von der Viskosität und dem Einfluss mechanischer Belastung die Wechselwirkung von Bitumen und Gestein abbilden. Dabei scheint vor allem die Probenkonditionierung (u.a. Wasserqualität, Konditionierungsdauer) eine entscheidende Rolle zu spielen.

8 Literatur

ASTM D 4124: Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions. American Society for Testing and Materials, 2009

DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren, Beuth **Verlag, Berlin**, 2012

DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Beuth Verlag, Berlin, 2013

DIN EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007

DIN EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007

DIN EN 12697-11: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, Beuth Verlag, Berlin, 2012

DIN EN 12274-7: Dünne Asphaltsschichten in Kaltbauweise - Teil 7: Schüttel-Abriebprüfung, Beuth Verlag, Berlin, 2005

DIN EN 12593: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß; Deutsche Fassung EN 12593; 2007

DIN EN 12607-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren; Beuth Verlag, Berlin, 2013

DIN EN 13702-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der dynamischen Viskosität von modifizierten Bitumen – Teil 1: Platte-Kegel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

DIN EN 13703: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Formänderungsarbeit; Beuth Verlag, Berlin, 2003

DIN EN 13589: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bindemittel mit dem Kraftduktilitäts-Verfahren; Beuth Verlag, Berlin, 2010

DIN EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR); Beuth Verlag, Berlin, 2013

DIN EN 14771: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR); Beuth Verlag, Berlin, 2013

TP Asphalt StB 07, Teil 12: Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern, FGSV-Verlag, Köln, 2007

TP Asphalt StB 07, Teil 23: Spaltzugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern, FGSV-Verlag, Köln, 2007

TL Bitumen-StB 07: Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen - TL Bitumen–StB 07, Ausgabe 2013; FGSV-Verlag, Köln, 2013

BÖHLER, N.: Entwicklung eines fotooptischen Verfahrens zur Auswertung des Rolling-Bottle-Tests auf Basis von MATLAB®. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Bochum, 2014

CETINKAYA, R.: Bewertung der Einflussgrößen auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt. Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, 2011

CLAUDY, P.; LÉTOFFÉ, J.M.; KING, G.N.; PLANCHE, J.P.: Caractérisation des bitumes routiers par analyse calorimétrique différentielle (ACD). Analyse thermo-optique (ATO). Corrélation entre propriétés physiques et résultats ACD. Bull Liaison Lab Ponts Chaussées, 177, 1992

CORBETT, L.W.: Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphalting, elution-adsorption chromatography and densimetric characterization. Analytical Chemistry 41, 1969

COX, W. P.; MERZ, E.P.: Correlation of Dynamic and Steady Flow Viscosities, Journal of Polymer Science, Vol. 28, 1958

GROTHER, H.; WISTUBA, M.: Affinität Bitumen/Gestein – eine dauerhafte Verbindung?, Gestrata Journal, Nr. 129, 2010

HARDERS, O.; NÖSLER, I.: Einfluss der Oberflächenaktivität von Mineralstoffen auf das Gebrauchsverhalten von Walzasphalt, Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. (ARBIT), Bitumen, 65, 1, 2003

HIRSCH, V.; FRIEMEL-GÖTTLICH, B.: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode, Straßenbau Heft S 59, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009

JADA, A.; SALOU, M.: Effects of asphaltene and resin contents of the bitumens on the water-bitumen interface properties. Journal of Petroleum Science and Engineering 33, 2002

KHUDYASKOVA, T.S., ROSENTAL, D.A., MASHKOVA, I.A.: Effect of the chemical composition of bitumens in the adhesion strength of bitumen-mineral mixes. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, Vol. 27, 1991

KOOTS, J.A.; SPEIGHT, J.G.: Relation of petroleum resins to asphaltenes. Fuel, Vol. 54, 1975

LABIB, M.E.: Asphalt-aggregate interactions and mechanism for water stripping. Prep. Pap. American Chemical Society, Div. Fuel Chemistry 37 (3), 1992

LESUEUR, D.: The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. Advances in Colloid and Interface Science 145, 2009

- LOEBER, L.; MULLER, G.; MOREL, J.; SUTTON, O.:** Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach. Fuel, Vol. 77, 1998
- MACK, C.:** Physical Properties of Asphalts in Thin Films. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 49, No. 3, 1957
- MAJIDZADEH, K.; BROVOLD, F. N.:** Special Report 98: State of the Art: Effect of Water on Bitumen -Aggregate Mixtures, HRB, National Research Council, Washington D.C., 1968, übersetzt von Gragger, Schriftenreihe der Ilseder Schlackenverwertung Dr. Schmidt & CO. KG, Heft 11, 1971
- MANKE, R.:** Möglichkeiten der Charakterisierung eines modifizierten Bindemittels durch rheologische Kenngrößen aus Kraftduktilitätsmessungen. Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, 10.2009
- McBAIN, J. W.; HOPKINS, D. G.:** On Adhesives and Adhesive Action. The Journal of Physical Chemistry, Vol. 29, 1924
- McCANN, M.; ANDERSON-SPRECHER, R.; THOMAS, K. P.:** Statistical Comparison between SHRP Aggregate Properties and the Moisture Sensitivity of Aggregate-Binder Mixtures. Road Materials and Pavement Design, Vol. 6, Nr. 2, 2005
- MULLINS, O.C.; SABBAH, H.; EYSSAUTIER, J.; POMERANTZ, A.E.; BARRÉ, L.; ANDREWS, A.B.; RUIZ-MORALES, Y.; MOSTOWFI, F.; McFARLANE, R.; GOUAL, L.; LEPKOWICZ, R.; COOPER, T.; ORBULESCU, J.; LEBLANC, R.M.; EDWARDS, J.; ZARE, R.N.:** Advances in Asphaltenes Science and the Yen-Mullins Model. Energy and Fuels, Vol. 26, 2012
- NELLENSTEYN, F.J.:** Bereiding en Constitutie van Asphalt, Delft / Netherland, 1923
- NEUMANN, H.-J.:** Was ist Bitumen?. Bitumen, 57. Jahrgang, 1995
- NÖSLER, I.:** Beitrag zur prüftechnischen Ansprache des Haftverhaltens zwischen Mineralstoff und Bitumen, Dissertation; Wuppertal, 2000
- OKRUSCH, M.; MATTHES, S.:** Mineralogie – Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, 9. Auflage, Springer Spektrum, 2014
- PIÉRI, N.:** Etude du Vieillissement Simulé et In-situ des Bitumes Routiers par IRTF et Fluorescence UV en Excitation-Emission Synchrones. Marseille / France, 1995
- RENKEN, P.:** Haftung zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen – ein Statusbericht. Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. (ARBIT), Bitumen, Heft 1, März 2003
- RENKEN, P.; WISTUBA, M.; GRÖNNIGER, J.; SCHINDLER, K.:** Adhäsion von Bitumen am Gestein (Haftverhalten) – Verfahren der quantitativen Bestimmung auf Grundlage der Europäischen Normung, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 07.0209/2005/EGB, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1043, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2010
- RENKEN, P.:** Adhäsion – gibt es objektive Bewertungskriterien?, Giesel Verlag GmbH, asphalt, Heft 7, 2011
- REUTER, F.; KLENGEL, K. J.; PASEK, J.:** Ingenieurgeologie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, 3. Auflage, 1992

- RICE, J. M.:** Relationship of Aggregate Characteristics to the Effect of Water on Bituminous Paving Mixtures. America Society for Testing and Materials, STP 240, 1958
- RUBE, N.; GEHRKE, M.:** Adhäsion von Bitumen und Gestein – Eine Frage der Bitumenchemie?, Asphalt-Seminar 2013, Willingen, 2013
- SEBOR, G.; BLAZEK, J.; NEMER, M. F.:** Optimization of the preparative separation of petroleum maltenes by liquid absorption chromatography, Journal of Chromatography A, 847, 1999
- SPEIGHT, J.G.:** Petroleum Asphaltenes Part 1: Asphaltenes, Resins and the Structure of Petroleum, Oil & Gas Science and Technology, Vol. 59, 2004
- THIMM, L.:** Validierung eines gaschromatographischen Analyseverfahrens zur Qualitätssicherung des in Deutschland verwendeten Straßenbaubitumens. Diplomarbeit, Fachbereich Chemie Universität Duisburg-Essen, 2003
- WEISE, C.; OESER, M.:** Der Einfluss von Wasser auf das Ermüdungsverhalten von Splittmastixasphalten. Straße und Autobahn, Kirschbaum Verlag, Bonn, Nr. 12, 2010
- WHITEOAK, D.; READ, J.:** The Shell Bitumen Handbook. 5. Auflage, Thomas Telford Publishing, London / England, 2003
- ZENKE, G.:** Zum Löseverhalten von "Asphaltenen": Anwendung von Löslichkeitsparameter-Konzepten auf Kolloidfraktionen schwerer Erdölprodukte. Clausthal, 1989
- ZENKE, G.:** Stoffbestand und Verhalten von Straßenbaubitumen: Eine Übersicht zum Stande der Erkenntnisse (I). Bitumen, 52. Jahrgang, 1990
- ZHANG, L.; GREENFIELD, M.L.:** Relaxation time, diffusion, and viscosity analysis of model asphalt systems using molecular simulation. The Journal of Chemical Physics 127, 2007
- ZOOROB, S.E., AIREY, G.D.:** An investigation into the effect of composition on performance of penetration grade road bitumens, Part 1: SARA analysis. 3rd International SIV Congress, 2005

Internetpräsenzen:

- [ARBIT] <http://www.arbit.de>
- [BP] http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/bitumen/bp_bitumen_germany/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/b/bending_beam_rheometer.pdf
- [KORN, 2004] www.bitumen-gestein.de/3_Beschreibung%20des%20Haftverhaltens.html
- [Mineralölwirtschaftsverband] <http://www.mwv.de/index.php/ueberuns/pipelines>
- [SCHMIDT, 2014] <http://www.vsvi-hessen.de/download/20140122/vsvi20140122schmidt.pdf>
- [ZIELKE, 2008] <http://wbserver.bau.uni-wuppertal.de/SeSb/Vortraege/06%20-%20Zielke%20deu.pdf>

Abbildungsverzeichnis

Bild 3-1:	Raffineriestandorte und Pipelines in Deutschland [Mineralölwirtschaftsverband].....	8
Bild 3-2:	Veränderung des Kolloidsystems in Abhängigkeit von der Temperatur [aus CETINKAYA, 2011 in Anlehnung an ZENKE, 1990]	9
Bild 3-3:	links: Prinzipskizze Bending Beam Rheometer [BP] rechts: Schematische Darstellung, Brechpunkt nach Fraaß [ARBIT].....	10
Bild 3-4:	links: Duktilitätsform [MANKE; 2009 in Anlehnung an DIN EN 13589] rechts: Schematische Darstellung, Nadelpenetration [ARBIT].....	11
Bild 3-5:	Schematische Darstellung, Erweichungspunkt Ring und Kugel [ARBIT].....	11
Bild 3-6:	Prinzipskizze dynamisches Scherrheometer [ZIELKE, 2008].....	12
Bild 3-7:	Mittlere chemische Zusammensetzung eines Bitumens [WHITEOAK; READ, 2003]	13
Bild 3-8:	Vereinfachte Erdölfraktionierungsmethode [SPEIGHT, 2004].....	14
Bild 3-9:	Mizellen-Modell [NÖSLER, 2000].....	16
Bild 3-10:	Yen-Mullins Modell [MULLINS, et al., 2012].....	16
Bild 3-11:	Der Kreislauf der Gesteine [OKRUSCH, MATTHES, 2014]	17
Bild 4-1:	Einfluss der Prüfdauer beim Rolling-Bottle-Versuch auf die Kreisförmigkeit [RUBE, GEHRKE, 2013].....	26
Bild 4-2:	Schüttelabriebgerät	27
Bild 4-3:	Qualität der Benetzung in Abhängigkeit vom Kontaktwinkel [KORN, 2004]	29
Bild 5-1:	Nadelpenetration bei 25 °C und Erweichungspunkt Ring und Kugel der untersuchten Straßenbaubitumen	30
Bild 5-2:	Auswirkungen einer Kurzzeitalterung (RTFOT): Verbleibende Nadelpenetration bei 25 °C und Zunahme des Erweichungs- punktes Ring und Kugel der untersuchten Straßenbaubitumen	31
Bild 5-3:	Brechpunkt nach Fraaß der untersuchten Straßenbaubitumen.....	32
Bild 5-4:	m-Wert und Biegekriechsteifigkeit (jeweils bei -16 °C) der untersuchten Straßenbaubitumen	32
Bild 5-5:	Temperaturabhängige komplexe Schermoduln der untersuchten Straßenbaubitumen	33
Bild 5-6:	Temperaturabhängige Phasenwinkel der untersuchten Straßenbaubitumen.....	33
Bild 5-7:	Paraffingehalte der untersuchten Straßenbaubitumen	34
Bild 5-8:	Chemischen Zusammensetzungen der untersuchten Straßenbaubitumen anhand der SARA-Analyse und des Asphaltenstatus nach ZENKE; je Bitumensorte die Mittelwerte sowie das Minimum und das Maximum.....	34
Bild 5-9:	Ergebnisse der Siedeanalysen der untersuchten Straßenbau- bitumen.....	35

Bild 5-10:	Ergebnisse des Rolling-Bottle-Tests zur Auswahl der Gesteine für weitere Adhäsionsversuche.....	38
Bild 5-11:	Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Rhyolith	39
Bild 5-12:	Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Diabas	40
Bild 5-13:	Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Grauwacke	40
Bild 5-14:	Ergebnisse Rolling-Bottle-Test Basalt	41
Bild 6-1:	Komplexer Schermodul bei 0 bzw. -10 °C in Abhängigkeit von der Biegekriechsteifigkeit bei -16 °C.....	49
Bild 6-2:	Phasenwinkel bei 0 bzw. -10 °C in Abhängigkeit von dem m-Wert bei -16 °C	49
Bild 6-3:	Biegekriechsteifigkeit und m-Wert jeweils bei -16 °C in Abhängigkeit vom Brechpunkt nach Fraaß.....	50
Bild 6-4:	Korrelation zwischen Nadelpenetration und dem komplexen Schermodul bzw. dem Phasenwinkel jeweils bei 25 °C	51
Bild 6-5:	Komplexe Schermoduln bei der Temperatur des Erweichungspunktes Ring und Kugel	51
Bild 6-6:	Korrelation zwischen Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Äquiviskositätstemperatur (= Temperatur, bei der der komplexe Schermodul 15 kPa beträgt).....	52
Bild 6-7:	Abhängigkeit zwischen der komplexen Viskosität bei 120 °C und der Biegekriechsteifigkeit bei -16 °C bzw. dem komplexen Schermodul bei 25 °C	53
Bild 6-8:	Plastizitätsspanne (Erweichungspunkt und Brechpunkt nach Fraaß) der untersuchten Straßenbaubitumen	53
Bild 6-9:	Kraftduktilitätsverlauf bei 15 °C des 2.1 50/70 vor bzw. nach der Modifizierung mit den Elastomeren bzw. Plastomeren	54
Bild 6-10:	Komplexe Schermoduln in Abhängigkeit von der Temperatur des Bitumen 2.1 50/70 vor bzw. nach der Modifizierung mit den Elastomeren bzw. Plastomeren.....	55
Bild 6-11:	Black-Diagramm des Bitumen 2.1 50/70 vor bzw. nach der Modifizierung mit den Elastomeren bzw. Plastomeren	56
Bild 6-12:	Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in Aromaten, polare Verbindungen und der Summe aus Aliphaten und Asphaltene der Bitumen 20/30 bzw. 160/220.....	58
Bild 6-13:	Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in leicht-, mittel- und schwerlösliche Asphaltene der Bitumen 20/30 bzw. 160/220 (* das auffällige Ergebnis wurde durch eine Überprüfung bestätigt)	58
Bild 6-14:	Siedeanalyse, jeweils dargestellt sind die Mittelwerte der Bitumensorten	59
Bild 6-15:	Biegekriechsteifigkeit bzw. m-Wert bei -16 °C in Abhängigkeit vom Asphaltengehalt der Bitumen	61
Bild 6-16:	Korrelation zwischen dem Asphaltengehalt und dem komplexen Schermodul bzw. dem Phasenwinkel bei 25 °C	62

Bild 6-17:	Korrelation zwischen dem Asphaltengehalt und der Äquiviskositätstemperatur (= Temperatur, bei der der komplexe Schermodul 15 kPa beträgt).....	63
Bild 6-18:	Korrelation zwischen dem Asphaltengehalt und der komplexen Viskosität bei 120 °C	63
Bild 6-19:	Korrelation zwischen dem Asphaltengehalt und der Plastizitätsspanne bzw. dem Quotienten aus dem komplexen Schermodul bei 0 °C und dem komplexen Schermodul bei 60 °C	64
Bild 6-20:	Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerien 1 und 2	65
Bild 6-21:	Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerien 4 und 5	65
Bild 6-22:	Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerien 6 und 7	65
Bild 6-23:	Mittelwert, Minimum, Maximum und Anzahl der Proben der Bitumen 50/70 und 70/100 der acht Raffinerien für den Erweichungspunkt Ring und Kugel und den Brechpunkt nach Fraaß.....	67
Bild 6-24:	Siedeanalyse, jeweils dargestellt sind die Mittelwerte der Bitumen 50/70 der verschiedenen Raffinerien.....	68
Bild 6-25:	Siedeanalyse, jeweils dargestellt sind die Mittelwerte der Bitumen 50/70 der Raffinerien 1 und 7 sowie deren die Varianten mit den leichtest siedenden bzw. am schwersten siedenden Anteilen.....	69
Bild 6-26:	Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in Aromaten, polare Verbindungen und der Summe aus Aliphaten und Asphaltene der Bitumen 50/70	70
Bild 6-27:	Mittelwert, Minimum, Maximum und Anzahl der Proben der Bitumen 50/70 und 70/100 der acht Raffinerien für den Asphaltengehalt.....	70
Bild 6-28:	Dreistoffdiagramm zur Unterscheidung in leicht-, mittel- und schwerlösliche Asphaltene der Bitumen 50/70.....	71
Bild 6-29:	Asphaltengehalt der Frischbitumen in Abhängigkeit von der Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel durch die RTFOT-Alterung.....	72
Bild 6-30:	Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerie 1 im frischen und gealterten (RTFOT) Zustand	72
Bild 6-31:	Black-Diagramm der Bitumen der Raffinerie 1 im frischen und gealterten (RTFOT) Zustand	73
Bild 6-32:	Original-Bild rechts, „Cluster-Bild“ links - Grauacke nach 24 h mit 6.R1 30/45 [Böhler, 2014].....	74
Bild 6-33:	Korrelation der Mittelwerte der Ergebnisse der visuellen Schätzung und der Mittelwerte der Ergebnisse von MATLAB [Böhler, 2014].....	74
Bild 6-34:	Umhüllungsgrade in Abhängigkeit von der Rolldauer und dem Gestein.....	75
Bild 6-35:	Umhüllungsgrade nach 24 h im Vergleich zur Porosität der Gesteine	76

Bild 6-36:	Umhüllungsgrade nach 24 h im Vergleich zum Quarzanteil der Gesteine	76
Bild 6-37:	Zusammenhang zwischen der Nadelpenetration und dem Umhüllungsgrad nach 24 h.....	77
Bild 6-38:	Zusammenhang zwischen dem komplexen Schermodul bei 20 °C und dem Umhüllungsgrad nach 24 h.....	77
Bild 6-39:	Zusammenhang zwischen dem Anteil der polaren Verbindungen und dem Umhüllungsgrad nach 24 h.....	78
Bild 6-40:	Zusammenhang zwischen dem Anteil der Asphaltene und dem Umhüllungsgrad nach 24 h.....	78
Bild 6-41:	Zusammenhang zwischen dem Umhüllungsgrad und dem Anteil der polaren Verbindungen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Viskosität der Bitumen	79
Bild 6-42:	Abrieb im Vergleich zur Porosität der Gesteine	80
Bild 6-43:	Abrieb im Vergleich zum Quarzanteil der Gesteine	80
Bild 6-44:	Vergleichende Darstellung der Abriebergebnisse aller Bitumen und Gesteine	81
Bild 6-45:	Zusammenhang zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und dem Abrieb	81
Bild 6-46:	Zusammenhang zwischen dem komplexen Schermodul bei 20 °C und dem Abrieb	82
Bild 6-47:	Zusammenhang zwischen dem Anteil der Asphaltene und dem Abrieb	82
Bild 6-48:	Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Schüttelabriebprüfung und dem komplexen Schermodul bei 20 °C	83
Bild 6-49:	Vergleichende Darstellung der ITSR-Werte aller Bitumen mit Rhyolith und Basalt	84
Bild 6-50:	Zusammenhang zwischen den ITSR-Werten und dem komplexen Schermodul bei 20 °C	84
Bild 6-51:	Zusammenhang zwischen den ITSR-Werten und dem Anteil an polaren Verbindungen	85
Bild 6-52:	Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der Ermüdungslastwechselzahl vor und nach Wasserlagerung der ausgewählten Bitumen für Rhyolith und Basalt	85
Bild 6-53:	Vergleichende Darstellung der Oberflächenspannungen der ausgewählten Bitumen	86
Bild 6-54:	Vergleichende Darstellung des unterschiedlichen Spreitverhaltens der ausgewählten Bitumen auf Rhyolith, Grauwacke und Basalt	87
Bild 6-55:	Zusammenhang zwischen dem Anteil der polaren Verbindungen und dem Spreitverhalten der verschiedenen Bitumen in Abhängigkeit vom Gestein.....	87
Bild 6-56:	Umhüllungsgrade der verschiedenen PmB bei Rhyolith nach 6, 24 und 48 h	89

Bild 6-57:	Einfluss der Polymermodifizierung auf den Umhüllungsgrad nach 24 h bei Diabas, Grauwacke und Basalt	89
Bild 6-58:	Einfluss der Polymermodifizierung auf den Abrieb bei Diabas, Grauwacke und Basalt	90

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Gliederung magmatischer Gesteine in Abhängigkeit vom SiO ₂ -Gehalt [WEISE, OESER, 2010].....	18
Tab. 3-2:	Bautechnisch wichtige magmatische Festgesteine, ihre Eigenschaften und Hauptvorkommen [in Anlehnung an REUTER et al., 1992].....	18
Tab. 3-3:	Einflussgrößen auf das Haftverhalten in Anlehnung an [RENKEN, 2011; GROTHE, WISTUBA, 2010; HIRSCH, FRIEMEL-GÖTTLICH, 2009; LABIB, 1992]	20
Tab. 4-1:	Übersicht der entnommenen Bitumenproben	23
Tab. 5-1:	Ergebnisse der Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel der modifizierten Bitumen.....	31
Tab. 5-2:	Quarzanteile der Gesteine.....	36
Tab. 5-3:	Reindichte, Porosität und spez. Oberfläche der Lieferkörnung 8/11 mm	36
Tab. 5-4:	Mineralische Zusammensetzung der Gesteinsproben	37
Tab. 5-5:	Für die Adhäsionsversuche ausgewählte Bitumen	39
Tab. 5-6:	Ergebnisse Rolling-Bottle-Test mit Rhyolith, Diabas, Grauwacke und Basalt mit den Polymermodifizierten Bitumen	41
Tab. 5-7:	Ergebnisse des Schüttelabriebversuchs mit Rhyolith, Diabas, Grauwacke und Basalt	42
Tab. 5-8:	Ergebnisse des Schüttelabriebversuchs der Polymermodifizierten Bitumen mit Rhyolith, Diabas, Grauwacke und Basalt	42
Tab. 5-9:	Mischgutzusammensetzung und -eigenschaften der Probekörper für die Bestimmung der Wasserempfindlichkeit.....	43
Tab. 5-10:	Ergebnisse der statischen Spaltzugversuche bei T = 15 °C mit Basalt und Rhyolith	44
Tab. 5-11:	Ergebnisse der dynamischen Spaltzug-Schwellversuche bei T = 15 °C bei mittlerer Belastung mit Basalt und Rhyolith	45
Tab. 5-12:	Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen der Gesteine	46
Tab. 5-13:	Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen der Bitumen	46
Tab. 5-14:	Spreitverhalten der ausgewählten Bitumen bei Basalt und Rhyolith .	47
Tab. 6-1:	Vergleich der Varianten bei den Prüfverfahren zur Bewertung der Wasserempfindlichkeit, dem Schüttelabriebversuch und dem Rolling-Bottle-Test.....	88