

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18942 N

## Thema

Qualitätssicherung von Asphalt ohne Lösemittel - Erarbeitung alternativer Verfahrensweisen für die Durchführung der WPK

## Berichtszeitraum

01.12.2015 bis 28.02.2018

## Forschungsvereinigung

Deutsches Asphaltinstitut (DAI) e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

Universität Kassel, SG Bau und Erhaltung von Verkehrswegen

Kassel, 03.09.2018

---

Ort, Datum

Dr.-Ing. Konrad Mollenhauer

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



## Inhalt

Inhalt.....	3
1. Einleitung .....	5
2. Stand der Wissenschaft und Technik.....	6
2.1. Werkseigene Produktionskontrolle .....	6
2.2. Bisherige in der WPK eingesetzte Prüfverfahren.....	6
2.3. Bindemittelgehaltsbestimmung mittels Thermoanalyse .....	7
2.4. Mechanische Asphalteigenschaften .....	9
3. Methodik.....	11
3.1. Untersuchungsprogramm .....	11
3.2. Prüfverfahren .....	11
3.2.1. Thermoanalyse .....	11
3.2.2. Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes .....	13
3.2.3. Mechanische Prüfungen .....	13
3.3. Untersuchungsmaterialien .....	16
3.3.1. Gesteinskörnungen.....	16
3.3.2. Bitumen.....	16
3.3.3. Asphaltgranulat.....	16
3.4. Voruntersuchungen Thermoanalyse.....	17
3.5. Untersuchungen an im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten.....	17
4. Ergebnisse .....	28
4.1. Ergebnisse der Voruntersuchungen .....	28
4.1.1. Bestimmung der Masseveränderung der Gesteinskörnungen während der Thermoanalyse .....	28
4.1.2. Ergebnisse der Thermoanalyse an den Asphaltgranulatproben.....	28
4.1.3. Masseveränderung von Gesteinskörnungen .....	29
4.1.4. Einfluss der thermischen Beanspruchung der Trockentrommel auf den Masseverlust der Gesteinskörnung.....	30
4.1.5. Einfluss der Verbrennungstemperatur auf den Masseverlust.....	32
4.1.6. Temperaturverlauf während der Thermoanalyse.....	32
4.2. Ergebnisse der lösemittelfreien Asphaltanalyse an Labormischungen.....	33
4.2.1. AC 22 TS .....	33
4.2.2. AC 16 B S .....	47
4.2.3. AC 11 D S.....	58
4.2.4. SMA 8 S.....	62

4.2.5.	Gussasphalt MA 8 S .....	73
4.3.	Validierung durch Begleitung einer echten WPK .....	78
4.3.1.	Ergebnisse der WPK an SMA 8 S und AC 8 DS .....	78
4.3.2.	Ergebnisse der WPK an Asphaltmischgut für Asphalttragschichten .....	82
5.	Interpretation der Ergebnisse .....	87
5.1.	Eignung der Thermoanalyse für die Überprüfung der Mischgutzusammensetzung .....	87
5.1.1.	Bindemittelgehalt .....	87
5.1.2.	Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes .....	89
5.1.3.	Identifikation abweichender Asphaltvarianten anhand der mechanischen Eigenschaften .....	91
6.	Schlussfolgerungen .....	93
6.1.	Bestimmung des Bindemittelgehaltes mittels Thermoanalyse .....	93
6.2.	Bestimmung der Korngrößenverteilung am Verbrennungsrückstand nach der Thermoanalyse .....	93
6.2.1.	Bestimmung der Eigenschaften am Marshall-Probekörper als Hinweis zu mechanischen Asphalteeigenschaften .....	94
7.	Zusammenfassung .....	96
8.	Literatur .....	97

## 1. Einleitung

Im Rahmen der werkseigenen Qualitätskontrolle (WPK) überprüft der Hersteller die Qualität des hergestellten Asphaltmischgutes in festgelegten Intervallen (DIN EN 13108-21). Dabei werden neben Untersuchungen von am Asphaltmischwerk angelieferten Baustoffkomponenten Gesteinskörnungen, Bitumen und Zusätze auch die relevanten Eigenschaften des fertig hergestellten Asphaltmischgutes (Zusammensetzung und Bindemittleigenschaften) überwacht.

Gemäß TP Asphalt-StB, Teile 1 und 3, wird der Bindemittelgehalt mittels Extraktionsanalyse unter Verwendung organischer Lösemittel ermittelt, während am rückgewonnenen Bindemittel relevante Bitumeneigenschaften und an den Gesteinskörnungen die Korngrößenverteilung überprüft werden. Deutschlandweit wird dafür das krebserregende Lösemittel Trichlorethylen verwendet, welches im Anhang XIV der REACH-Verordnung aufgenommen wurde und dessen Einsatz daher ab 2016 nur noch bei ausdrücklicher Zulassung durch die Europäische Kommission möglich ist. Daher sind alternative Verfahren zu prüfen, um den Einsatz des karzinogenen Lösemittels im Rahmen der WPK von Asphalt zu ersetzen (DAI 2014). Die Verwendung von weniger gesundheitsschädlichen Alternativlösemitteln stellt dazu eine Möglichkeit dar und wird zur Zeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht (BMVBS 2014).

Im Rahmen dieser Forschungsvorhaben sollte ein Verfahren entwickelt und erprobt werden, welches die Durchführung der werkseigenen Produktionskontrolle in Asphaltmischwerken ohne Lösemittelseinsatz ermöglicht. Zielvorgaben waren dabei die zeitliche Verfügbarkeit der Ergebnisse, um Produktionsabläufe anpassen zu können, die Präzision und somit die Verlässlichkeit der Prüfergebnisse sowie der erforderliche gerätetechnische und personelle Aufwand für die Durchführung der WPK.

Nach Zusammenstellung des Standes der Technik (Kapitel 2) wurden umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, deren Systematik in Kapitel 3 erläutert wird. Zunächst wurden Voruntersuchungen hinsichtlich der Thermoanalyse und mechanischen Asphaltprüfungen durchgeführt. Unter Nutzung eines einheitlichen Prüfablaufs wurden dann im Labor Asphaltmischgutvarianten hergestellt, welche sich in verschiedenen Parametern der Zusammensetzung unterscheiden. Insbesondere wurden bei diesen Variationen die Toleranzgrenzen nach DIN EN 13108-21 berücksichtigt, um konforme und nicht-konforme Asphaltmischungen herzustellen. Damit sollte überprüft werden, ob nicht-konforme Asphaltmischungen mittels der alternativen Verfahren identifiziert werden können. Abschließend wurde die werkseigene Produktionskontrolle für ausgewählte Asphalte in zwei Asphaltmischwerken begleitet um den direkten Vergleich der Ergebnisse aus herkömmlicher und alternativer WPK ziehen zu können.

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen werden in Kapitel 4 zusammengestellt und diskutiert. In Kapitel 5 folgen die Interpretation der Untersuchungsergebnisse sowie Schlussfolgerungen und Empfehlungen hinsichtlich der Anwendbarkeit alternativer Verfahren im Rahmen der WPK.

## 2. Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1. Werkseigene Produktionskontrolle

Die werkseigene Produktionskontrolle (WPK) ist ein maßgeblicher Bestandteil des Qualitätssicherungssystems für Auswahl, Konzeption, Herstellung, Einbau und Kontrolle von Asphaltmischgut bzw. Asphaltbefestigungen. Gemäß den Vorgaben der EU-Bauproduktenverordnung ist der Hersteller eines Bauproduktes – hier Asphaltmischgut – dazu verpflichtet, den Herstellungsprozess selbst zu überwachen. Gemäß den DIN EN 13108-21 sind neben organisatorischen Maßnahmen der Qualitätssicherung auch Prüfungen relevanter Eigenschaften an aus der fortlaufenden Asphaltmischgutproduktion entnommenen Proben vorgeschrieben. Dabei wird überprüft, ob der großtechnisch hergestellte Baustoff in ausgewählten Eigenschaften der Erstprüfung, in welcher die wesentlichen Merkmale des Asphaltmischgutes anhand von Laborprüfungen bestimmt wurden, entspricht. Die dabei im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle erlaubten Toleranzen zwischen den Prüfergebnissen, welche an den aus der Produktion entnommenen Proben bestimmt wurden, und den in der Erstprüfung festgelegten Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

**Tabelle 1: Im Rahmen der WPK an Asphalt überprüfte Eigenschaften und Toleranzen für die Beurteilung der Konformität einer Produktion (Auszug aus Tabelle A.1 und D.2 der DIN EN 12697-21)**

Zulässige Abweichungen zwischen Asphaltmischgutprobe und Sollzusammensetzung [abs. M.-%]				
Eigenschaft des Asphaltmischgutes		Asphaltmischgutart		
		grobkörniges Asphaltmischgut (D > 11 mm)	feinkörniges Asphaltmischgut (D ≤ 11 mm)	Gussasphalt
Bindemittelgehalt		± 0,6	± 0,5	± 0,5
Siebdurchgang	charakt. Grobsieb D	+5 / -9	+5 / -9	+5 / -9
	D/2	± 9	± 7	± 8
	2 mm	± 7	± 6	± 8
	charakt. Feinsieb	± 5	± 4	-
	0,063 mm	± 3	± 2	± 4
Weitere zu überprüfende Eigenschaften zur Sicherstellung des Produktionsprozesses		Eigenschaften des rückgew. Bindemittels		
		Hohlraumgehalt (MPK)		-
		-		Stempel-eindringtiefe

Da im Rahmen der Kontrollprüfung gemäß ZTV Asphalt-StB ebenfalls die Eigenschaften des an die Einbaustelle angelieferten Asphaltmischgutes überprüft werden, dienen die Ergebnisse der WPK neben der eigentlichen Eigenüberwachung auch der Dokumentation der Asphaltqualität für das Vertragsverhältnis zwischen Mischguthersteller und dem Einbauunternehmen.

### 2.2. Bisherige in der WPK eingesetzte Prüfverfahren

Zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes und der Korngrößenverteilung von Asphalt wird in Deutschland das Asphaltmischgut mit Hilfe von Lösemitteln in seine Komponenten Bitumen und Gestein aufgetrennt. An den rückgewonnenen Gesteinskörnungen werden die Korngrößen

ßenverteilung und an den rückdestillierten Bitumen die relevanten mechanischen Bitumeneigenschaften bestimmt. Gemäß den TP Asphalt-StB, Teile 1 und 3, dürfen zur Extraktion und Rückgewinnung Toluol und Trichlorethylen als Lösemittel verwendet werden. Während Toluol aufgrund seiner brennbaren Eigenschaften explosionsgeschützte Laboreinrichtungen erfordert, wurde die Verwendung von Trichlorethylen aufgrund seiner karzinogenen Eigenschaften nur unter hohen Auflagen der Arbeitssicherheit und vorerst nur bis 2023 formal genehmigt (Täube, 2013). Auch weitere, bisher in die EN 12697-3 aufgenommene Lösemittel weisen gesundheits- oder umweltschädigende Eigenschaften auf, sodass sie unter diesem Aspekt keine Alternativen darstellen.

Alternative Verfahren, welche ohne Verwendung von Lösemitteln auskommen, müssen in der Lage sein, in Ihrer Zusammensetzung bzw. Eigenschaften nicht-konforme Asphaltmischgutchargen zu identifizieren und auch die Art der Abweichung zu charakterisieren. Daher müssen folgende Asphalteigenschaften, welche zur Zeit im Rahmen der WPK überprüft werden und an welche auch vertragliche Anforderungen gemäß ZTV Asphalt-StB bestehen, erfasst werden können:

- Asphaltzusammensetzung:
  - Bindemittelgehalt,
  - Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches,
- Weitere Asphalteigenschaften
  - Hohlraumgehalt des Marshall-Probekörpers (bei Walzasphalt)
  - Stempeleindringtiefe (bei Gussasphalt)
  - Bindemiteleigenschaften (Erweichungspunkt Ring und Kugel, elastische Rückstellung).

### **2.3. Bindemittelgehaltsbestimmung mittels Thermoanalyse**

Bei der bereits 1969 in den USA entwickelten Thermoanalyse wird das Asphaltmischgut bei hohen Temperaturen ( $> 500\text{ °C}$ ) verascht. Über den Masseverlust wird der Gehalt des brennbaren Bindemittels bestimmt, während an den verbleibenden Gesteinskörnungen die Korngrößenverteilung des Asphaltmischgutes ermittelt wird. Die anfangs angewendeten Temperaturen um  $800\text{ °C}$  führten jedoch bei einigen Gesteinskörnungen (z. B. Kalkstein) zu signifikanten Massereduktionen und Kornzerstörungen, welche das Ergebnis der Untersuchungen beeinflussten (Brown et al. 1995). Hahn und Schneider (1991) konnten die Masseänderungen von Kalkstein auf unterschiedliche chemische Prozesse zurückführen:

- Verdunstung des Porenwassers ( $50\text{-}100\text{ °C}$ ),
- Abgabe chemisch gebundenen Wassers ( $200\text{-}450\text{ °C}$ ) und
- Entsäuerung von Kalkstein ( $600\text{-}900\text{ °C}$ ).

Weitere Einflüsse verschiedener Gesteinsarten wurden von Roßberg & Bader (1997) identifiziert und interpretiert, vgl. Abbildung 1. Demnach können in den dort betrachteten Gesteinskörnungen infolge chemischer Prozesse Masseänderungen von bis zu 1,6 % auftreten, welche nicht als Bindemittelgehalte interpretiert werden dürfen. Durch eine sukzessive Verringerung der Veraschungstemperatur (in den EN 12697-39 ist als Zieltemperatur  $540\text{ °C}$  - entsprechend  $1000\text{ °F}$  - verankert) konnte dieser Einfluss reduziert werden. Dennoch ist eine Anwendung von Kalibriermessungen erforderlich, um den Einfluss der verwendeten Gesteinskörnungen bei der Berechnung des Prüfergebnisses zu berücksichtigen.

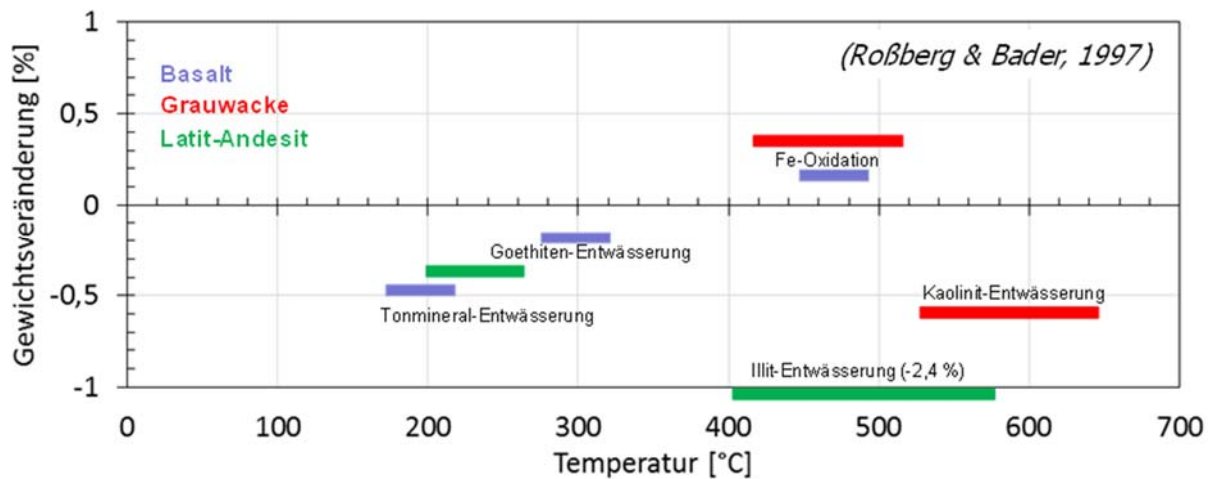


Abbildung 1. Gewichtsveränderungen verschiedener Minerale in Basalt, Grauwacke und Latit-Andesit in Abhängigkeit von der Temperatur (nach Roßberg & Bader, 1997)

Drüschner (1993) trennte den Masseverlust während der Thermoanalyse in eine Trocknungsphase und eine Bindemittel-Verbrennungsphase durch Messung des zeitlichen Verlaufs der Temperatur in der Untersuchungsprobe sowie des Masseverlustes. Dadurch konnte der Bindemittelgehalt (außer bei Verwendung poriger Gesteine) mit guter Präzision bestimmt werden.

Nach der Einführung der Thermoanalyse zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes in den USA beschäftigten sich Forschungsvorhaben mit der weiteren Temperaturreduktion zur Schonung temperaturempfindlicher Gesteinskörnungen (Kowalski et al., 2010) sowie mit der Ermittlung der Präzision der Prüfverfahrens (Sholar et al., 2001).

Im Europäischen Ausland hat die Thermoanalyse zum Teil bereits die Extraktionsverfahren ersetzt oder ergänzt (vgl. Jengsen et al. 2002). Bei Kenntnis der verwendeten Baustoffkomponenten und deren Masseänderungen bei thermischer Beanspruchung, wie es bei der werkseigene Produktionskontrolle für die Gesteinskörnungen und auch für Asphaltgranulat und mögliche Zusätze vorausgesetzt werden kann, können sowohl Bindemittelgehalt als auch die Korngrößenverteilung bestimmt werden. In Tabelle 2 sind die aus den technischen Regelwerken entnommenen Präzisionsangaben zusammengestellt. Mit der Thermoanalyse werden für die WPK relevante vergleichbare Wiederholpräzisionen für den Bindemittelgehalt erreicht wie mit dem bisherigen Extraktionsverfahren.

Tabelle 2: Versuchspräzision verschiedener Verfahren der Bindemittelgehaltsbestimmung

Prüfverfahren	Ringversuch (Land)	Asphaltvariante	Wiederholpräzision	Vergleichspräzision
DIN EN 12697-39	UK	B = 4 %	0,36	0,60
		B = 5 %		0,71*
		B = 6 %	0,37*	0,82*
		B = 7 %		0,93*
	Dänemark	GAB Typ 16	0,30	0,33
		AC 8	0,17	0,19
AC 16 B S		0,25	0,33	
TP Asphalt-StB, Teil 1	Deutschland	AC D, AC TD, SMA, PA	0,22	0,39
		AC T, AC B, MA	0,36	0,66

\*: Präzision der Thermoanalyse geringer als die des Extraktionsverfahrens



## 2.4. Mechanische Asphalteigenschaften

Abweichungen des Herstellungsprozesses können die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Asphaltmischgutes auch bei genauer Mischgutkomposition beeinflussen. Beispielsweise kann eine übermäßig hohe Herstellungstemperatur eine unzulässig hohe Alterung des Bindemittels bewirken. Daher sieht das bisherige WPK-System die Überprüfung der Bindemittleigenschaften an rückgewonnenen Bitumen vor.

Als Ersatz für krebserregende Lösemittel verwendeten Weingart et al. (2012) biogenen Caprylsäuremethylester, an den aufgrund seiner Nicht-Toxizität zurzeit geringere Anforderungen an die Arbeitssicherheit gestellt werden. An dem rückgewonnenen Bindemittel können so die relevanten Bitumeneigenschaften ermittelt werden, welche zur Identifikation von unzulässiger Verhärtung während der Asphaltherstellung sowie zur Überprüfung der Einbindung von bitumenwirksamen Additiven dienen. Jedoch hat auch das biogene Lösemittel die gleichen systemimmanenten Nachteile der herkömmlich verwendeten Lösemittel: Durch den Lösungsvorgang und der anschließenden Rückgewinnung können die Bindemittleigenschaften nachhaltig verändert werden, wodurch die Prüfung des rückgewonnenen Bindemittels nicht umfassende Rückschlüsse auf das Ausgangsbindemittel erlaubt.

Zusatzmittel, welche auf die mechanischen Asphalteigenschaften einwirken (z. B. Polymere, Wachse, Gummigranulat, Fasern, Haftverbesserer), erreichen im Rückgewinnungsprozess häufig nicht vollständig die Bitumenprobe, sodass die Überprüfung der Bitumeneigenschaften an rückgewonnenen Bindemitteln nur bedingt geeignet ist, um Rückschlüsse auf die Asphalteigenschaften zu ziehen.

Herstellungsparameter, welche die mechanischen Asphalteigenschaften – jedoch weder Bindemittleigenschaften noch die Zusammensetzung beeinflussen – bleiben unerkannt (z. B. unzulässig geringe Mischzeit).

Als Alternative bietet sich die Überprüfung der tatsächlichen mechanischen Asphalteigenschaften an. Im Rahmen von erweiterten Erstprüfungen für Baumaßnahmen mit besonders hohen Ansprüchen an die Baustoffe werden bereits komplexe Performance-Prüfungen durchgeführt. Diese sind für den Einsatz im Rahmen der WPK nicht geeignet, da Prüfergebnisse erst mehrere Tage bzw. Wochen nach der Herstellung von Asphalt-Probekörpern vorliegen, sodass eine im Rahmen der Qualitätssicherung notwendige Anpassung der Mischwerkseinstellungen anhand der Ergebnisse nicht möglich ist. Daher sind für die WPK Prüfverfahren erforderlich, mit denen relevante Ergebnisse bereits nach kurzer Prüfzeit vorliegen. Hierbei ist erstrebenswert, in den Labors bereits vorhandene Standard-Prüfeinrichtungen nutzen zu können.

Mögliche Prüfungen sind die Erfassung des Verdichtungswiderstandes gemäß TP Asphalt-StB, Teil 10, der Spaltzugfestigkeit gemäß TP Asphalt-StB, Teil 23 und der Marshall-Versuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 34. Im Rahmen der WPK werden die an dem frisch hergestellten Asphaltmischgut ermittelten Kennwerte mit den im Rahmen der Erstprüfung in diesen vergleichsweise einfachen Prüfverfahren ermittelten Asphalteigenschaften bzw. mit den Ergebnissen der vergangenen WPK-Untersuchungen verglichen.

Bereits kurze Zeit nach der Herstellung des Asphaltmischgutes können Ergebnisse zum mechanischen Verhalten des Asphaltmischgutes durch die Bestimmung des Verdichtungswiderstandes (TP Asphalt-StB, Teil 10 B) ermittelt werden. Der gemessene Verdichtungswiderstand reagiert dabei auf Veränderungen der Asphaltzusammensetzung (Arand & Renken, 1992;

Renken, 2002). Die mischgutabhängige Ausprägung dieses Einflusses erlaubt zwar keine grundsätzlichen Rückschlüsse auf die weiteren mechanischen Eigenschaften, jedoch können Unterschiede der Zusammensetzung identifiziert werden. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass herstellungsbedingte Unterschiede (Zugabetemperatur, Nachmischzeit, Granulatqualität) bei der Verwendung von Asphaltgranulat in Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten den labortechnisch erfassten Verdichtungswiderstand signifikant beeinflussen (Leutner et al., 2005). Damit werden auch solche Abweichungen im Herstellungsprozesses identifiziert, welche Auswirkungen auf die Asphaltqualität haben jedoch nicht die z. B. durch Thermoanalyse erfasste Zusammensetzung ändern.

Die als Beispiele genannten Prüfverfahren sind aufgrund der hohen Zahl an Einflussfaktoren auf das mechanische Verhalten von Asphalt allein nicht geeignet um eine Optimierung des Asphaltmischgutes im Rahmen der Erstprüfung zu erreichen. Für den Einsatz im Rahmen der WPK jedoch sind viele dieser Einflussfaktoren stark eingegrenzt. So ist die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes bekannt und kann z. B. durch die Thermoanalyse verifiziert werden. Aufgabe der Prüfverfahren im Rahmen der WPK ist ein Soll-Ist-Vergleich der mit vergleichsweise einfachen mechanischen Prüfungen erfassten Kenngrößen erfolgen.

## 3. Methodik

### 3.1. Untersuchungsprogramm

Das im Rahmen des Forschungsprojektes angewendete Untersuchungsprogramm gliederte sich in drei Abschnitte.

Zu Beginn des Projektes wurden Voruntersuchungen zur Festlegung des weiteren Untersuchungsprogrammes durchgeführt. Weiterhin wurden einzelne Fragestellungen weitergehend verfolgt, welche anhand von Untersuchungsergebnissen im Projektverlauf aufgeworfen wurden.

Im zweiten Untersuchungsabschnitt wurden Asphaltmischgutvarianten im Labor hergestellt und mittels lösemittelfreier Verfahren untersucht. Dabei wurden die Zusammensetzung sowie verschiedene Herstellungsparameter der Asphaltvarianten variiert.

Im dritten Untersuchungsabschnitt wurden Asphaltmischgutproben aus der laufenden Produktion zweier Asphaltmischwerke entnommen. Dabei wurden Herstellungschargen untersucht, an denen auch die herkömmlichen Prüfungen der Werkseigenen Produktionskontrolle durch den Asphalthersteller durchgeführt wurden.

### 3.2. Prüfverfahren

#### 3.2.1. Thermoanalyse

Zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes durch Thermoanalyse gemäß DIN EN 12697-39 wurde ein Glühofen mit integrierter Waage verwendet, vgl. Abbildung 2. Zur Durchführung der Thermoanalyse wurde die erforderliche Menge Asphaltmischgut auf die Metallkörbe eingewogen, mit einer weiteren gelochten Metallplatte abgedeckt und in den auf die Verbrennungstemperatur zwischen 480 °C und 600 °C vorgeheizten Ofen eingebracht. Dabei wurde das Gewicht der Metallkörbe mit ( $m_2$ ) und ohne ( $m_1$ ) Probe erfasst. Mittels integrierter Waage wird der Verbrennungsprozess im Ofen überwacht. Das Prüfgerät meldet das Erreichen der Massekonstanz mit einem Signalton und wertet anhand des intern gemessenen Gewicht nach der Verbrennung sowie dem eingegebenen Gewicht der Metallkörbe den Masseverlust aus. Nach Entnahme und Abkühlen der Probe auf unter 100 °C wurde die Masse nach der Verbrennung ( $m_3$ ) auf einer Laborwaage bestimmt. Neben dem automatisch durch den Thermoofen angegebenen Massenverlust in Bezug auf die Ausgangsprobe  $dm_i$  wurde anhand der Massebestimmung auf der Laborwaage der Masseverlust  $dm_e$  bestimmt:

$$dm_e = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \quad \text{Gleichung 1}$$

Da viele Gesteinskörnungen bereits bei den zur Thermoanalyse eingesetzten Temperaturen Masseänderungen erfahren (vgl. Kapitel 2.3), muss ein Kalibrierwert zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes berücksichtigt werden. Dazu beschreibt die DIN EN 12697-39 (2012) folgende Möglichkeiten der Bestimmung des Kalibrierwertes:

- auf Grundlage von im Labor hergestelltem Asphaltmischgut (Verfahren A.2): Unter Laborbedingungen werden drei Asphaltmischgutproben der gewünschten Rezeptur hergestellt und direkt im Anschluss der Thermoanalyse unterzogen. Vom Mittelwert der ermittelten Masseverluste wird der Soll-Bindemittelgehalt abgezogen.
- auf Grundlage von parallel durchgeführten Extraktionsversuchen (Verfahren A.3): Drei Proben eines Asphaltmischgutes werden parallel mittels Thermoanalyse und Extrakti-

onsanalyse untersucht. Der Kalibrierwert wird als Differenz der Mittelwerte des Masseverlustes und dem nach TP Asphalt-StB, Teil 1, ermittelten Bindemittelgehalt berechnet.

- auf Grundlage der Untersuchung des Gesteinskörnungsgemisches ohne Bindemittelzugabe (Trockenmischung – Verfahren A.4): Aus bei 110 °C getrockneten Gesteinskörnungen wird ein Gesteinskörnungsgemisch gemäß der angewendeten Asphaltmischgutzusammensetzung hergestellt. Dabei kann auch das verwendete Asphaltgranulat eingesetzt werden. An dieser Trockenprobe wird dann der Masseverlust mittels Thermoanalyse bestimmt. Eine alternative Verfahrensweise sieht vor, dass die Masseänderung für jede Lieferkörnung ermittelt wird und der Kalibrierwert des Asphaltmischgutes rechnerisch anhand der prozentualen Anteile der Lieferkörnungen bestimmt wird.

Zur Berechnung des Bindemittelgehaltes  $B_{th}$  aus dem Masseverlust  $\Delta m$  wird der vorab für das Asphaltmischgut ermittelte Kalibrierwert  $C_F$  abgezogen.

$$B_{th} = \Delta m - C_F \quad \text{Gleichung 2}$$

Für die Untersuchungen wurde das Verfahren A.4 angewendet. Anhand des an dem Gesteinskörnungsgemisch ermittelten Masseverlust  $C_{FA}$  sowie dem angestrebten Bindemittelgehalt der Asphaltvariante  $B_A$  wird der Kalibrierwert  $C_F$  nach Gleichung 3 bestimmt.

$$C_F = C_{FA} \cdot \left(1 - \frac{B_A}{100}\right) \quad \text{Gleichung 3}$$

Für die Thermoanalyse an den im Labor hergestellten Asphaltvarianten wurde der Masseverlust des Gesteinskörnungsgemisches  $C_{FA}$  anhand der Massenanteile  $p_i$  und der jeweiligen Masseverluste  $C_{FA,i}$  der eingesetzten Lieferkörnungen berechnet (vgl. Gleichung 4).

$$C_{FA} = \frac{\sum(p_i \cdot C_{FA,i})}{100} \quad \text{Gleichung 4}$$

Im Rahmen der begleitenden Untersuchung der aus der großtechnischen Mischgutproduktion entnommenen WPK-Proben wurde der Masseverlust des Gesteinskörnungsgemisches jeweils an einer der Erstprüfung entsprechenden Trockenmischung bestimmt.

Für Mischgutvarianten, die Asphaltgranulat enthalten, wird der Kalibrierwert  $C_{FA}$  überschätzt, da die Trockenmischung ebenfalls das Bindemittel des Asphaltgranulates enthält. Daher muss im Falle der Asphaltgranulatzugabe der Kalibrierwert des Gesteinskörnungsgemisches mit Asphaltgranulat gemäß Gleichung 5 korrigiert werden. Dabei wird neben dem Asphaltgranulatannteil  $p_{AG}$  der geschätzte Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates  $B_{AG}$  berücksichtigt.

$$C_{FA,kor} = C_{FA} - \left(B_{AG} \cdot \frac{p_{AG}}{100}\right) \quad \text{Gleichung 5}$$



**Abbildung 2. Verwendeter Thermo-Ofen (links), Asphaltmischgutprobe vor (rechts oben) und nach (rechts unten) der Thermoanalyse**

### **3.2.2. Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes**

Zur Untersuchung der Korngrößenverteilung der im Asphaltmischgut enthaltenen Gesteinskörnungen wurde der Verbrennungsrückstand nach der Thermoanalyse einer Siebanalyse gemäß TP Asphalt-StB, Teil 2, unterzogen. Gemäß DIN EN 12697-39 haftet der Feinanteil durch den Verbrennungsvorgang stark an den groben Gesteinskörnungen, sodass eine Nasssiebung vorzuziehen ist. Dieser Umstand wurde im Rahmen der Untersuchungen dadurch berücksichtigt, dass die Siebanalyse des Verbrennungsrückstandes in unterschiedlicher Kombination aus Nass- und Trockensiebung durchgeführt wurde:

- nur Trockensiebung
- nur Nasssiebung
- Nasssiebung der zuvor trocken gesiebten Probe.

### **3.2.3. Mechanische Prüfungen**

Im Rahmen der WPK von Asphaltmischgut erfolgt eine Überprüfung der Bindemittleigenschaften des rückgewonnenen Bitumens. Damit soll überprüft werden, ob die vorgesehene Bindemittelsorte zum Einsatz gekommen ist oder ob im Prozess der Asphaltherstellung unzu-

lässige thermische und/oder oxidative Beanspruchungen Veränderungen der Bindemittleigenschaften verursacht haben. Weiterhin kann das Vorhandensein von Modifikationen (z. B. Polymerzugabe, viskositätsverändernde Zusätze, Gummigranulat) identifiziert werden.

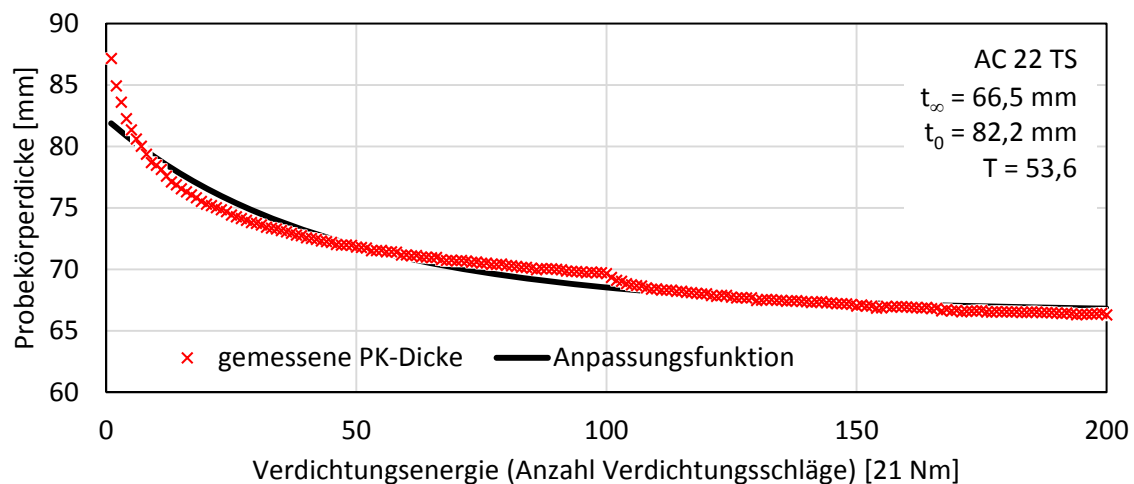
Bei der Thermoanalyse kann kein Bindemittel rückgewonnen werden. Daher wurden als Alternative Kennwerte des Asphaltmischgutes (Verdichtungswiderstand, Marshallstabilität und Fließwert und Spaltzugfestigkeit) bestimmt, um zu prüfen, ob die Ergebnisse Rückschlüsse auf die genannten Prozessabweichungen erlauben können.

### 3.2.3.1. Verdichtungswiderstand

Der Verdichtungswiderstand wurde gemäß TP Asphalt-StB, Teil 10 B bestimmt. An den Verläufen der während der Schlagverdichtung mit jeweils 100 Verdichtungsschlägen (der Verdichtungsenergie  $E_2$ ) je Probekörperseite gemessenen Probekörperdicke  $t$  wurden der Verdichtungswiderstand  $T$ , die Anfangsdicke  $t_0$  sowie die rechnerische minimale Dicke  $t_\infty$  gemäß der in Gleichung 6 angegebenen Formel mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepasst. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die gemessene Probekörperdicke und die daraus bestimmte Anpassungsfunktion.

Je Asphaltvariante wurden drei Einzelprüfungen durchgeführt.

$$\frac{1}{t(E_2)} = \frac{1}{t_\infty} - \left[ \frac{1}{t_\infty} - \frac{1}{t_0} \right] \cdot e^{-\frac{E_2}{T}} \quad \text{Gleichung 6}$$



**Abbildung 3. Beispiel für den Verlauf der Probekörperdicke sowie der Anpassungsfunktion zur Ermittlung des Verdichtungswiderstandes**

### 3.2.3.2. Marshallstabilität und –fließwert

Nach Herstellung der Marshall-Probekörper mit 50 Verdichtungsschlägen je Probekörperseite gemäß TP Asphalt-StB, Teil 30 wurde zunächst die Raumdichte an drei Probekörpern mittels Tauchwägung nach TP Asphalt-StB, Teil 6 bestimmt. Direkt im Anschluss wurde der Probekörper im Wasserbad für 50 Minuten auf die Prüftemperatur von 60 °C temperiert. Nach Temperieren wurde die Marshallprüfung gemäß TP Asphalt-StB, Teil 34 durchgeführt, wobei die Prüfung ca. 180 Minuten nach der Herstellung der Probekörper erfolgte. Je Asphaltvariante wurden Stabilität und Fließwert an drei Probekörpern bestimmt.

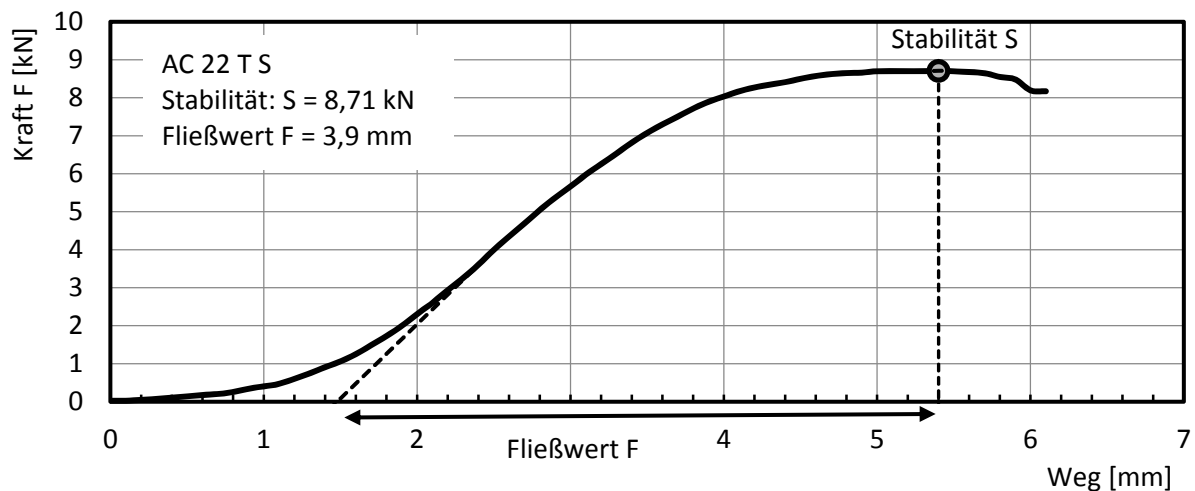


Abbildung 4. Beispiel für die Messdaten und Auswertung der Marshall-Stabilität und des Fließwertes

### 3.2.3.3. Spaltzugfestigkeit

An jeweils drei Probekörpern einer Asphaltvariante wurde die Spaltzugfestigkeit gemäß TP Asphalt-StB, Teil 23 bestimmt. Die Prüfung erfolge bei 15 °C. Dazu wurden die Probekörper nach der Herstellung trocken gelagert. Nach Erreichen der Raumtemperatur wurden die Probekörperabmessungen und die Raumdichte durch Ausmessen bestimmt. Frühestens am Folgetag wurden die Probekörper in einer Temperierkammer auf 15 °C mit umströmender Luft temperiert. Während der Spaltzugversuche wurden vertikale und horizontale Verformungen des Probekörpers gemessen. Die vertikale Verformung wurde am Pressentisch und die horizontale Verformung mittels an einen Messrahmen montierten Wegaufnehmer direkt am Probekörper abgegriffen.

Abbildung 5 zeigt die verwendete Prüfeinrichtung sowie ein Beispiel für die während der Prüfung erfassten Messdaten. Anhand dieser wurden folgende Kennwerte bestimmt:

- Spaltzugfestigkeit ITS
- Horizontalverformung bei maximaler Vertikalkraft  $u_h$
- Verformungsarbeit bis zum Kraftmaximum  $W_{ITS}$ .

Die Spaltzugfestigkeit wird gemäß Gleichung 7 anhand der aufgezeichneten Maximalkraft bestimmt. Durch die Messung der vertikalen und horizontalen Verformung können zudem Kennwerte der Asphaltsteifigkeit bestimmt werden. Dazu wird zum Zeitpunkt der Maximalkraft  $t_{FMax}$  die horizontale Verformung  $u_{h,ITS}$  bestimmt. Weiterhin wird anhand des Verlaufes der Vertikalkraft  $F$  in Abhängigkeit der vertikalen Verformung  $u$  die bis zur Maximalkraft geleistete kumulierte Verformungsarbeit  $W_{kum}$  gemäß Gleichung 8 berechnet.

$$ITS = \frac{2 \cdot F_{Max}}{\pi \cdot D \cdot H} \quad \text{Gleichung 7}$$

$$W_{kum} = \int_{u=0}^{u_{FMax}} F(t) du \quad \text{Gleichung 8}$$

mit:

$F_{Max}$ : Maximalkraft während des Spaltzugversuchs [N]

$D$ : Probekörperdurchmesser [mm]

$H$ : Probekörperhöhe [mm].

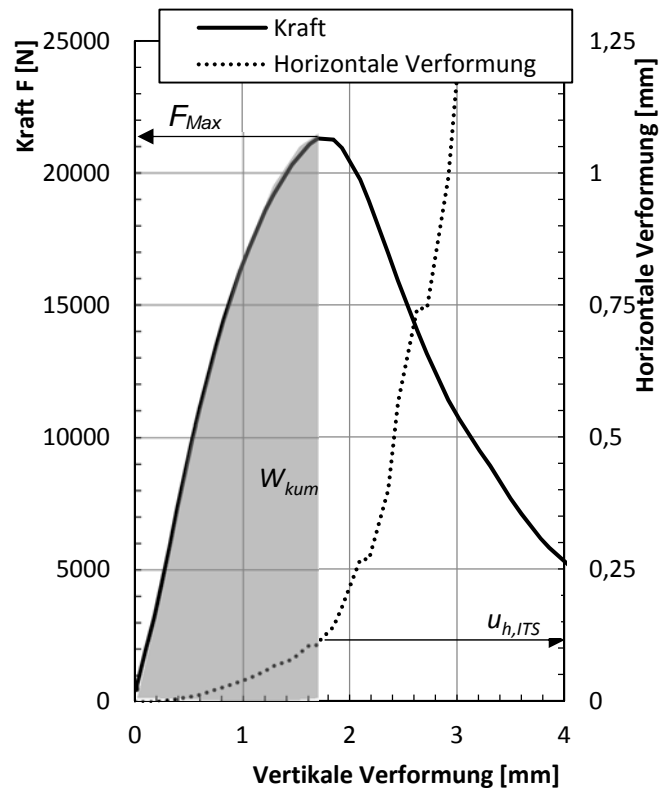


Abbildung 5. Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (links) und Verlauf der Kraft sowie der vertikalen und horizontalen Verformung (rechts)

### 3.3. Untersuchungsmaterialien

Für die Untersuchungen zur Überprüfung der lösemittelfreien Asphalt-WPK wurde Asphaltmischgut im Labor sowie großtechnisch im Asphaltmischwerk hergestelltes Asphaltmischgut verwendet.

#### 3.3.1. Gesteinskörnungen

Der Großteil der im Labor untersuchten Asphaltvarianten wurden unter Verwendung von Gesteinskörnungen aus Basalt des Herstellers Melato-Wegener des Steinbruchs Rhünda/Felsberg hergestellt. Das Basaltgestein wird zur großtechnischen Herstellung von Asphaltmischgut verwendet und stammt aus zwei Abbaugebieten des Steinbruchs.

Als weitere Gesteinskörnungen kamen Gabbro, Granodiorith, Quarzit, Grauwacke und Kalkstein (Oolith) zur Anwendung.

#### 3.3.2. Bitumen

Für die Herstellung der Asphaltvarianten im Labor wurden Bitumen gemäß TL Bitumen-StB von verschiedenen Herstellern verwendet.

#### 3.3.3. Asphaltgranulat

Im Rahmen der Labormischungen kamen vier verschiedene Asphaltgranulate zum Einsatz. Die Asphaltgranulate wurden von Halden auf Asphaltmischwerken in größerer Mengen entnommen. Durch Extraktionsanalysen wurden die in Tabelle 3 gezeigten Zusammensetzungen der Asphaltgranulate bestimmt.



**Tabelle 3. Zusammensetzung der eingesetzten Asphaltgranulate**

Asphaltgranulat	AG 1	AG 2	AG 3	AG 4
Bindemittelgehalt B [%]	5,4	3,0	4,5	5,4
Erweichungspunkt $T_{R\&K}$ [°C]	63,4	73,6	67,0	76,0

Korngrößenverteilung:

Sieblochweite [mm]	AG 1 [%]	AG 2 [%]	AG 3 [%]	AG 4 [%]
0,0625	15	10	12	18
0,125	20	12	15	22
0,25	25	15	18	28
1	40	25	30	42
2	50	35	40	52
4	65	50	55	68
8	80	70	75	85
16	90	85	90	95
32	98	95	98	100

### 3.4. Voruntersuchungen Thermoanalyse

Im Vorfeld der Untersuchungsreihe an Asphaltmischgutproben, welche im Labor hergestellt wurden bzw. die aus der großtechnischen Produktion entnommen wurden, wurden verschiedene Vorversuche durchgeführt, welche insbesondere der Analyse von Einflussgrößen der Thermoanalyse dienen:

- Bestimmung von Kalibrierwerten für die eingesetzten Gesteinskörnungen:  
 Insbesondere zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes der im Labor hergestellten Asphaltmischgutproben wurden an den einzelnen Lieferkörnungen der eingesetzten Gesteinskörnungen die Masseveränderungen infolge der Thermoanalyse bestimmt. Dies diente insbesondere der Bestimmung der Kalibrierwerte nach dem Verfahren A.4 (vgl. Kapitel 3.2.1).  
 Dabei wurde unter anderem untersucht, ob die thermische Beanspruchung der Gesteinskörnungen durch die Trockentrommel des Asphaltmischwerkes die Masseänderung während der Thermoanalyse beeinflusst.  
 Weiterhin wurde mittels Thermo-Gravimetrischer Analyse (TGA) bei einzelnen Gesteinskörnungen der Verlauf der Masseänderung in Abhängigkeit von der Temperatur analysiert.
- Temperaturverlauf in Gesteins- und Asphaltmischgutproben während der Thermoanalyse
- An im Asphaltmischwerk entnommenen Asphaltmischgutproben wurde die mit dem eingesetzten Thermoanalysegerät erreichbare Wiederholpräzision abgeschätzt.

### 3.5. Untersuchungen an im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten

Die im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten wurden auf Grundlage von Erstprüfungen eines Asphaltherstellers verwendet, welcher die im Rahmen des Projektes maßgeblich verwendete Gesteinskörnung zur Produktion von Asphaltmischgut verwendet. Zum Teil kommen jedoch abweichende Lieferkörnungen zum Einsatz, sodass die Labor-Zusammensetzungen des Gesteinskörnungsgemisches rechnerisch anhand der an den genommenen Proben ermittelten Korngrößenverteilung bestimmt wurden. Zunächst wurden für die Herstellung der

Asphaltproben im Labor direkt die entnommenen Lieferkörnungen verwendet. Aufgrund festgestellter Abweichungen und Streuungen der Prüfergebnisse wurden später im Projektverlauf die groben Gesteinskörnungen durch Nasssiegung von Unter- und Überkorn befreit. Die Rezepturen der Asphaltmischgutvarianten wurden entsprechend angepasst.

Neben den Mischgutzusammensetzungen der Erstprüfungen (Soll-Varianten) wurden verschiedene Parameter der Zusammensetzung variiert, um zu überprüfen, ob die lösemittelfreien Analyseverfahren die angestrebten Variationen identifizieren können. Dazu wurden folgende Variationen vorgenommen:

- Variation des Bindemittelgehaltes im Rahmen der zulässigen Toleranzen für konforme Asphaltmischgutchargen gemäß DIN EN 13108-21,
- Variation des Gesteinskörnungsgemisches: Dazu wurden die Anteile der Gesteinslieferkörnungen angepasst, um abweichende Korngrößenverteilung entsprechend den Toleranzen für konforme Asphaltmischgutchargen gemäß DIN EN 13108-21 zu erreichen. Weiterhin wurden Asphaltmischungen gemäß der Soll-Varianten hergestellt, wobei einzelne Lieferkörnungen nicht eingemischt wurden, um verstopfte Siebe oder falsch bestückte Doseure zu simulieren.
- Variation der Bindemittelsorte
- Variation der eingesetzten Gesteinsarten
- Zugabe von Asphaltgranulat
- Variation von Mischparametern (Mischzeit, Lagerungszeit).

#### **3.5.1.1. Asphaltbeton für Asphalttragschichten AC 22 TS**

Als Grundlage für die im Asphaltlabor zusammengesetzten Asphaltbetone für Asphalttragschichten diente die gemäß der in Tabelle 4 zusammengefasste Zusammensetzung.

Die Zusammensetzungen der untersuchten Variationen des AC 22 TS-Mischgutes sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die bei den Labor-Mischungen angestrebten Korngrößenverteilungen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Die Asphaltvariationen mit unterschiedlichen Bindemittelgehalten, variierten Gesteinskörnungen sowie Asphaltgranulatzugaben sind in schwarz bzw. grau dargestellt und liegen in einem engen Bereich innerhalb der zulässigen Grenzen gemäß TL Asphalt-StB. Die Asphaltvarianten mit zielgerichtet variierten Korngrößenverteilungen, welche die WPK-Toleranzen gemäß DIN EN 13108-21 widerspiegeln, sind farbig dargestellt. Die rot dargestellten Abweichungen im Füllerbereich (Kornanteil  $< 0,063 \text{ mm} \pm 3 \%$ ) zeigen, dass die verwendeten Lieferkörnungen ebenfalls zu Abweichungen im Bereich der feinen Gesteinskörnungen führen. Dahingegen konnte für die Abweichungen der Siebdurchgänge bei 2 mm um die WPK-Toleranz  $\pm 6 \%$  (grün) sowie des Grobkornanteils, hier repräsentiert durch den Siebdurchgang bei 22 mm um  $+5/-9 \%$  (blau) der Bereich der Abweichungen besser kontrolliert werden.

Tabelle 4. Zusammensetzung der AC 22 TS-Variante (SOLL-Variante)

Gesteinskörnungsgemisch	
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [%]
31,5	100
22,4	98,8
16	81,3
11,2	68,2
8	54,4
5,6	44,1
2	31,1
1	25,2
0,25	10,6
0,125	7,3
0,063	5,7
Rohdichte	2,857 g/cm <sup>3</sup>

Bindemittel			
Bindemittelsorte	Straßenbaubitumen 5070		
Bindemittelgehalt	4,2 %	Mindest-Bindemittelgehalt	3,6 %

Asphaltemischgut	
Rohdichte	2,657 g/cm <sup>3</sup>
Raumdichte	2,487 g/cm <sup>3</sup>
Hohlraumgehalt	6,4 %

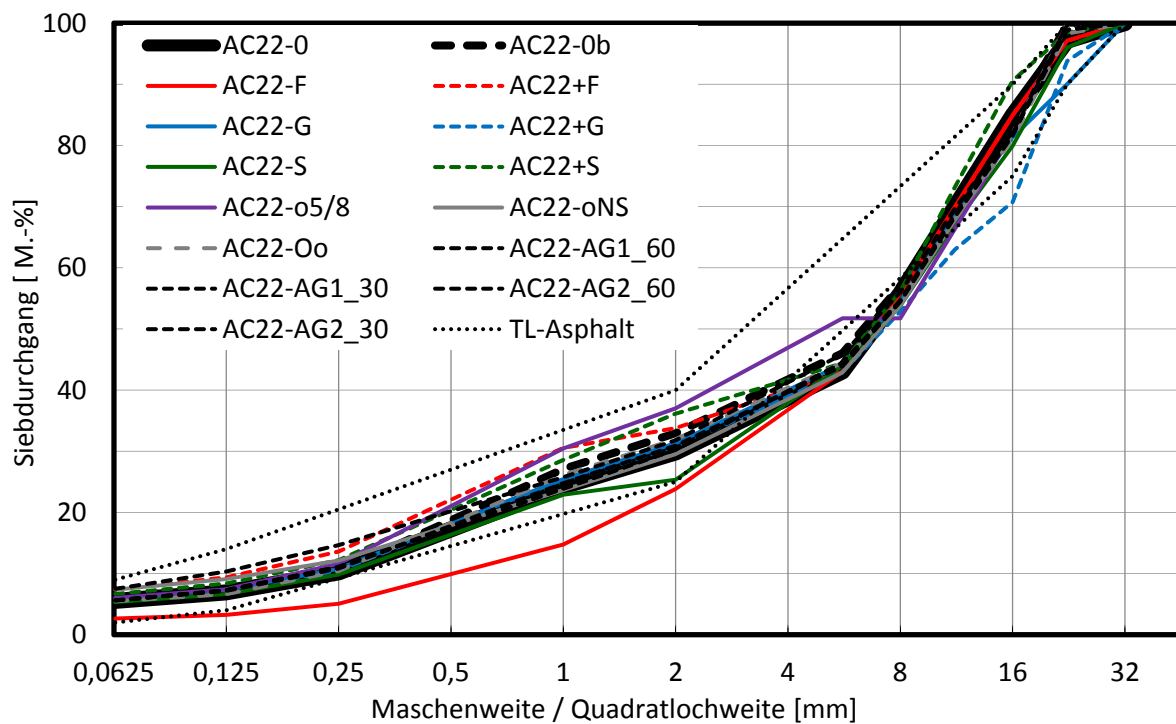


Abbildung 6. Angestrebte Korngrößenverteilungen der untersuchten AC22-TS-Variantionen

Tabelle 5: Untersuchte AC 22 TS-Variationen

Bezeichnung	Art der Variation	Bindemittelgehalt <sup>1)</sup>	Gesteinskörnungen (Art und Anteil)													
			ungewaschen	gewaschen	Füller	0/2(NS) <sup>2)</sup>	0/2(BS) <sup>2)</sup>	1/3 <sup>2)</sup>	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	22/32	Weitere	
AC22-0	Soll-Zusammensetzung	4,2	x		0	6	20	8	8	12	14	15,4	16,5	0,1		
AC22-B	Bindemittelgehalt -0,6 %	3,6	x													
AC22+B	Bindemittelgehalt +0,6 %	4,8	x													
AC22-F	Reduzierter Füllergehalt	4,2	x				8	20								
AC22+F	Erhöhter Füllergehalt		x				30	0	6							
AC22-G	Reduzierter Grobkornanteil		x				21,3	8,6	7,7	8,7	14,2	15,5	5,3	12,8		
AC22+G	Erhöhter Grobkornanteil		x				20,8	8,3	7,2	9	12	0	36,6	0,1		
AC22-S	Geringerer Anteil feiner G.		x				19,3	0	19,3	6,6	14,9	10,2	23,6	0,1		
AC22+S	Höherer Anteil der feinen G.		x				24,5	12,2	0	10,7	17,2	20,5	8,8	0,1		
AC22-0b	Wiederholung			x			20	8	8	12	14	15,4	16,5	0,1		
AC22-0c	Wiederholung		4,2		x	1	12	17	8	8	11	13	14	15,8	0,2	
AC22+Bb	Bindemittelgehalt +0,6 %		4,8		x											
AC22-Bb	Bindemittelgehalt -0,6 %	3,6		x												
AC22-oNS	ohne Natursand	4,2		x	1	0	24,8	10	7	11	14	14	18	0,2		
AC22-o5/8	ohne Zugabe von 5/8			x	1,1	13,5	19,1	9	9	0	14,6	15,7	17,8	0,2		
AC22-Oo	Mit Kalkstein (Oolith)		x	x	1	12	13	8	5	9	12	10	4,8	0,2	25 % 0/22	
AC22-0H	30/45 statt 50/70				x	1	12	17	8	8	11	13	14	15,8	0,2	
AC22-0W	70/100 statt 50/70				x											
AC22-AG1a	Zugabe 30 % AG1, 50/70		2,62		x	2	11	0	5	3	7	11	13	17,8	0,2	30 % AG1
AC22-AG1b	Zugabe 30 % AG1, 70/100			x												
AC22-AG1c	Zugabe 60 % AG1, 50/70	0,99		x	0	0	0	0	0	3	8	12	16,8	0,2	60 % AG1	
AC22-AG1d	Zugabe 60 % AG1, 70/100				x											
AC22-AG2a	Zugabe 30 % AG2, 50/70	3,33		x	1,5	6	10	4	3,5	6,5	10,5	10	17,8	0,2	30 % AG2	
AC22-AG2b	Zugabe 30 % AG2, 70/100				x											
AC22-AG2c	Zugabe 60 % AG2, 50/70	2,44		x	2	5	0	0	0	2	7	7	16,8	0,2	60 % AG2	
AC22-AG2d	Zugabe 60 % AG2, 70/100				x											

<sup>1)</sup> bei Varianten mit AG-Zugabe: Zugabebindemittel; <sup>2)</sup> bei allen Varianten ungewaschen

### 3.5.1.2. Asphaltbinder AC 16 BS

Die untersuchten Asphaltbindervariante wurden ausgehend von der in Tabelle 6 zusammengefassten Erstprüfung hinsichtlich des verwendeten Bindemittelgehaltes, der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches, des verwendeten Bindemittels sowie der Zugabe von Asphaltgranulaten variiert. Die Zusammensetzung der 36 Asphaltvarianten sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

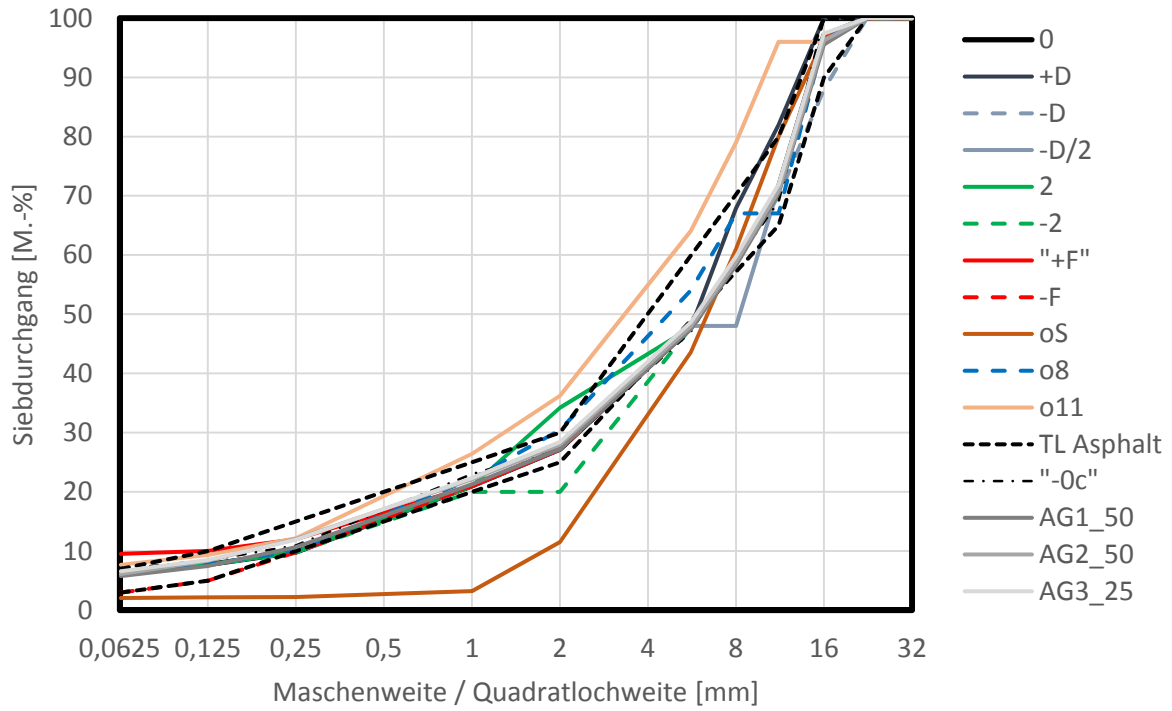
Bei den Variationen wurde zunächst der Bindemittelgehalt um  $\pm 0,3\%$  und  $\pm 0,6\%$  variiert. Weiterhin erfolgten Variationen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches. Dabei wurden die Zusammensetzung dahingehend modifiziert, dass einzelne Toleranzen der Siebdurchgänge im Grob- und Feinkornanteil sowie des Feinanteils gemäß EN 13108-21 genau angestrebt wurden. Weiterhin wurden Varianten hergestellt, bei denen gezielt einzelne Gesteinsklassen nicht dem Mischgut zugegeben wurden.

Weitere 10 Asphaltbinder wurden mit Zugabe von Asphaltgranulat hergestellt, wobei drei verschiedene Granulate mit jeweils zwei Zugabebindemitteln kombiniert wurden. Bei weiteren vier Varianten wurden jeweils andere Granulate zugegebenen, ohne die Zusammensetzung der frischen Gesteinskörnungen anzupassen.

Die im Rahmen der Mischrezeptur für die verschiedenen Varianten angestrebten Korngrößenverteilungen sind in Abbildung 7 dargestellt.

**Tabelle 6: Zusammensetzung der AC 16 B S-Variante (SOLL-Variante)**

<b>Gesteinskörnungsgemisch</b>			
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [%]		
31,5	100		
22,4	100		
16	100		
11,2	69,0		
8	59,0		
5,6	47,0		
2	27,2		
1	23,0		
0,25	10,9		
0,125	8,4		
0,063	7,0		
Rohdichte	2,895 g/cm <sup>3</sup>		
<b>Bindemittel</b>			
Bindemittelsorte	Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55A		
Bindemittelgehalt	4,5 %	Mindest-Bindemittelgehalt	3,6 %
<b>Asphaltmischgut</b>			
Rohdichte	2,675 g/cm <sup>3</sup>		
Raumdichte	2,515 g/cm <sup>3</sup>		
Hohlraumgehalt	6,0 %		



**Abbildung 7: Zusammensetzung der angestrebten Gesteinskörnungsgemische der verschiedenen Asphaltbindervarianten**

Tabelle 7: Untersuchte AC 16 BS-Variationen

Bezeichnung	Art der Variation	Bindemittel- gehalt <sup>1)</sup>	Gesteinskörnungen (Basalt)								AG-Zugabe
			Füller	0/2 <sup>2)</sup>	1/3 <sup>2)</sup>	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	
AC16-0	Soll-Variante	4,5	1,5	19	14,5	12,5	11	12,5	26	3	0
AC16+B1	Bindemittelg. +0,3 %	4,8									
AC16+B2	Bindemittelg. +0,6 %	5,1									
AC16-B1	Bindemittelg. -0,3 %	4,2									
AC16-B2	Bindemittelg. -0,6 %	3,9									
AC16+D	erhöhter Grobkornanteil	4,5	1,5	19	14,5	12,5	20,5	14	18	0	
AC16-D	verringertes Grobkorna.		1,5	19	14,5	12,5	11,5	11	18	12	
AC16-D2	verringertes Mittelkorna.		1,5	19	14,5	12,5	0	23,5	26	3	
AC16+2	erhöhter Sandgehalt		1,5	19	31	0	7	12,5	26	3	
AC16-2	verringertes Sandgehalt		1,5	19	0	27	11	12,5	26	3	
AC16+F	erhöhter Feinanteil		6,5	14	14,5	12,5	11	12,5	26	3	
AC16-F	verringertes Feinanteil		0	10	30	14	10	11	22	3	
AC16-oF	keine Zugabe 0/2		2	0	22,5	19	17,5	19	16,5	3,5	
AC16-o11	keine Zugabe 8/11		1,5	22	16,5	14	13	0	29,5	3,5	
AC16-o16	keine Zugabe 11/16		2	26	19,5	16,5	15	17	0	4	
AC16-0b	Wiederholung		1,5	19	14,5	12,5	11	12,5	26	3	
AC16-V	Var. Gesteinsgemisch		2	23	5	17	12	10	31	0	
AC16-Bit1	30/45		1,5	19	14,5	12,5	11	12,5	26	3	
AC16-Bit2	20/30										
AC16-Bit3	50/70										
AC16-Bit4	70/100										
AC16-Sas	50/70 + 3 % Sasobit										
AC16-GT	70/100 + 5 % Gummi (tr.)										
AC16-GN	70/100 + 5 % Gummi (n.)										
AC16-0c	Wiederholung	2	23	5	17	12	10	31	0		
AC16-3045	AG-Vergleichsvariante										
AC16-AG2-50a	50%AG2, 25/55-55A	3,1	1,5	7	2	8	4,5	7	20	0	50
AC16-AG2-50b	50%AG2, 50/70										
AC16-AG3-50a	50%AG3, 25/55-55A	2,3	0	8,5	1,5	9	3	6,5	21,5	0	50
AC16-AG3-50b	50%AG3, 50/70										
AC16-AG4-25a	25%AG4, 25/55-55A	3,2	0	13,5	7	9	8,5	9,5	25	0	25
AC16-AG4-25b	25%AG4, 50/70										
AC16-AG_F1	AG2 statt AG3; 25/55-55A	3,1	0	8,5	1,5	9	3	6,5	21,5	0	50
AC16-AG_F2	AG2 statt AG3; 50/70										
AC16-AG_F3	AG4 statt AG3; 50/70										
AC16-AG_F4	AG4 statt AG3; 50/70										

<sup>1)</sup> bei Varianten mit AG-Zugabe: Zugabebindemittel; <sup>2)</sup> bei allen Varianten ungewaschen

### 3.5.1.3. Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten AC 11 D S

Insgesamt wurden sechs Varianten eines Asphaltbetons für Asphaltdeckschichten AC 11 DS im Labor hergestellt und mittels der lösemittelfreien Verfahren untersucht. In Tabelle 8 ist die Erstprüfung der SOLL-Variante zusammengestellt. Weiterhin sind darin die variierten Korngrößenverteilungen für die drei Asphalte mit geändertem Gesteinskörnungsgemisch gezeigt. Die Rezepturen zur Herstellung der verschiedenen Asphaltvarianten sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

**Tabelle 8: Zusammensetzung der AC 11 D S-Variante (SOLL-Variante)**

<b>Gesteinskörnungsgemisch</b>	
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [%]
31,5	100,0
22,4	100,0
16	100,0
11,2	98,2
8	79,5
5,6	64,2
2	45,6
1	37,4
0,25	14,5
0,125	10,0
0,063	7,4
Rohdichte	2,890 g/cm <sup>3</sup>

<b>Bindemittel</b>			
Bindemittelsorte	50/70		
Bindemittelgehalt	5,9	Mindest-Bindemittelgehalt	5,6 %

<b>Asphaltmischgut</b>	
Rohdichte	2,610 g/cm <sup>3</sup>
Raumdichte	2,521 g/cm <sup>3</sup>
Hohlraumgehalt	3,4 %

**Tabelle 9: Untersuchte AC 11 DS-Variationen**

Bezeichnung	Art der Variation	Bindemittelgehalt (50/70)	Gesteinskörnungen (ungewaschen)					
			0/2 (Natursand)	Basalt (ungewaschen)				
				0/2	1/3	2/5	5/8	8/11
AC11-0	Soll-Variante	5,9	5	30	15	11	12	27
AC11-B	verringertes Bindemittelgehalt	5,4						
AC11+B	erhöhter Bindemittelgehalt	6,4						
AC11-F	feines Gesteinskörnungsgemisch	5,9	5	37,6	19	2	10	26,4
AC11-G	grobes Gesteinskörnungsgemisch		5	26,6	12,7	19,6	19,1	17
AC11-kS	keine Natursandzugabe		0	35	14	11	13	27

### 3.5.1.4. Splittmastixasphalt SMA 8 S

Die unter Laborbedingungen hergestellten Varianten des Splittmastixasphaltes basieren auf der in Tabelle 10 zusammengestellten Rezeptur. In Tabelle 11 sind die untersuchten Variationen der Splittmastixasphaltes zusammengestellt sowie deren Mischgutkompositionen genannt. Die Splittmastixasphaltvarianten können in drei Gruppen aufgeteilt werden, welche im Projektverlauf in ihrer Zusammensetzung leicht variiert wurden. Zunächst wurden die SMA-Varianten unter Verwendung nicht präparativ durch Waschen und Nasssiebung aufbereiteten groben Gesteinskörnungen hergestellt (in Tabelle 11 Variante SMA8-0 bis SMA8-0b). Innerhalb dieser



Gruppe wurde der Bindemittelgehalt und die Anteile verschiedener Gesteinskörnungen variiert.

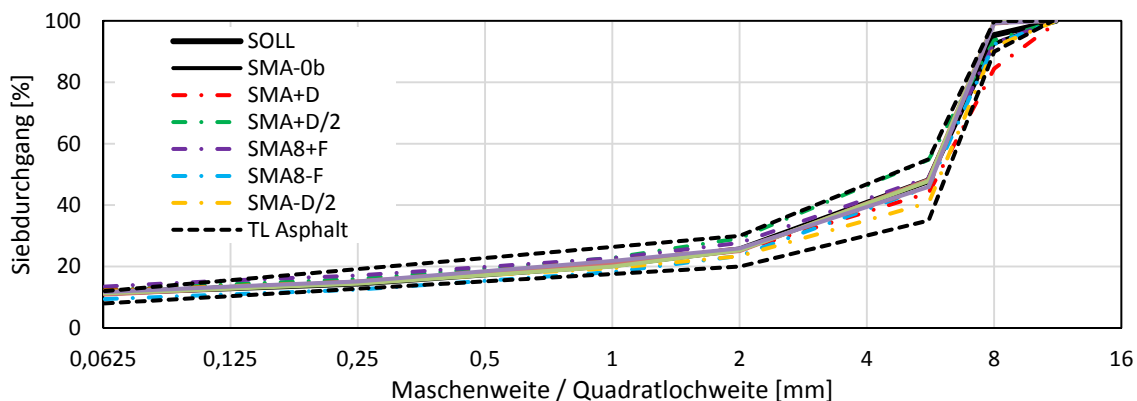
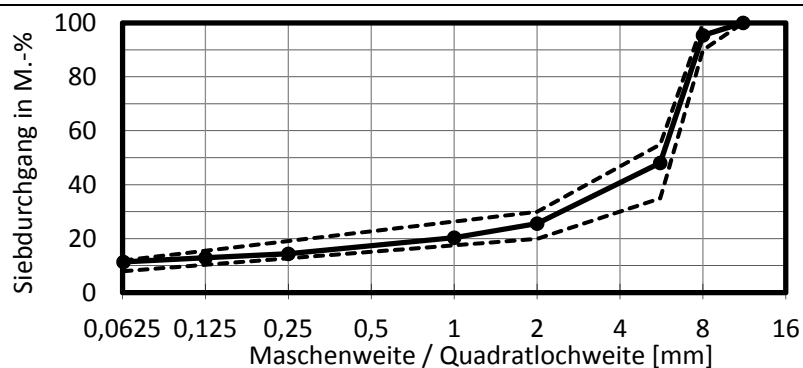
Ab SMA8-0c bis SMA-Gra wurden gewaschene Gesteinskörnungen verwendet. Neben der Variation von Füller und Gesteinsarten wurde eine weitere Rezeptur mit rechnerisch gleicher Korngrößenverteilung jedoch anderer Kombination der Lieferkörnungen untersucht (Varianten SMA8-0R und -0Rb).

Aufgrund der an den Vorgängervarianten festgestellten Hohlraumgehalte der Marshall-Probe-körper im oberen Bereich der Anforderungen der TL Asphalt-StB wurde für die verbleibenden Varianten der Bindemittelgehalt auf 7,4 % erhöht. Hierbei erfolgte eine Variation der eingesetzten Bindemittels sowie weiterer Mischparameter, welche Änderungen der mechanischen Asphalteeigenschaften infolge z. B. Bitumenalterung erwarten lassen.

Die sich aus den Variationen ergebenden Korngrößenverteilungen sind in Abbildung 8 gezeigt. Insgesamt liegen die untersuchten SMA-Variationen hinsichtlich der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches innerhalb der Anforderungen der TL Asphalt-StB.

**Tabelle 10: Zusammensetzung der SMA 8 S-Variante (SOLL-Variante)**

<b>Gesteinskörnungsgemisch</b>			
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [%]		
11,2	100		
8	95,4		
5,6	48,1		
2	25,6		
1	20,4		
0,25	14,4		
0,125	12,9		
0,063	11,4		
Rohdichte	2,841 g/cm <sup>3</sup>		
<b>Bindemittel</b>			
Bindemittelsorte	Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55A		
Bindemittelgehalt	7,3 %	Mindest-Bindemittelgehalt	6,8 %
Zusätze	0,3 %	Zellulosefasern	
<b>Asphaltmischgut</b>			
Rohdichte	2,565		
Raumdichte	2,484		
Hohlraumgehalt	3,16		



**Abbildung 8. Zusammensetzung der angestrebten Gesteinskörnungsgemische der verschiedenen Splittmastixasphaltvarianten**

**Tabelle 11: Untersuchte SMA 8 S-Variationen**

Bezeichnung	Art der Variation	Bindemittelgehalt <sup>1)</sup>	Gesteinskörnungen (Art und Anteil)									
			Kalkstein-Füller	Basalt 0/2(BS) <sup>1)</sup>	Basalt 1/3 <sup>1)</sup>	Basalt 2/5	Basalt 5/8	Basalt 8/11	Basalt-Füller	Grauwacke 2/5	Quarzit 5/8	Fasern
SMA8-0	Soll-Variante	7,3	9,7	10,2	10,8	11,0 <sup>1)</sup>	58,0 <sup>1)</sup>	0	0	0	0	0,3
SMA8+B	Bindemittelg. +0,5 %	7,8										
SMA8-B	Bindemittelg. -0,5 %	6,8										
SMA8-F	verring. Feinanteil -2 %	7,3	7,2	10,5	11,1	11,3 <sup>1)</sup>	59,6 <sup>1)</sup>					
SMA8+F	erhöhter Feinanteil +2 %		12,0	10,2	10,5	10,7 <sup>1)</sup>	56,3 <sup>1)</sup>					
SMA8+D/2	erhöhter Grobkornanteil		9,9	12,4	13,6	14,4 <sup>1)</sup>	49,4 <sup>1)</sup>					
SMA8-D/2	verring. Grobkornanteil		10,7	8,2	8,3	6,6 <sup>1)</sup>	65,9 <sup>1)</sup>					
SMA8+D	erhöhter Nennkorngehalt		10,1	10,1	9,3	9,3 <sup>1)</sup>	49,1 <sup>1)</sup>	11,8 <sup>1)</sup>				
SMA8-Fs	ohne Zellulosefasern		9,7	10,3	10,9	11,0 <sup>1)</sup>	58,1 <sup>1)</sup>	0				0
SMA8-R	Referenz-Mischgut (AMA)		6,0	12,0	5,0	0	41,0 <sup>1)</sup>		3,6	16 <sup>1)</sup>	16 <sup>1)</sup>	0,4
SMA8-0b	Soll-Variante (Wdh.)		9,7	10,2	10,8	11,0 <sup>1)</sup>	58,0 <sup>1)</sup>		0	0	0	0,3
SMA8-0c	Soll-Variante (gew. Gest.)		5	12,0	10,9	18,1	53,7		0	0	0	
SMA8-0R	Referenz-Mischgut (Wdh.)		6,0	12,0	5,0	0	41,0		3,7	16 <sup>1)</sup>	16 <sup>1)</sup>	
SMA8-0d	Soll-Variante (gew.-Wdh)		5,0	12,0	10,9	18,1	53,7		0	0	0	
SMA8-BF	Basaltfüller		0		5,0	0	41,0		9,7	16 <sup>1)</sup>	16 <sup>1)</sup>	
SMA8-KF	Kalksteinfüller		5,0						0			
SMA8-0Rb	Referenz-Mischgut (Wdh.)		6,0	12,0	5,0	0	41,0		3,7	16 <sup>1)</sup>	16 <sup>1)</sup>	
SMA8-Gab	Gabbro-Gesteinsk.		9	15 <sup>1)</sup>	15 <sup>1)</sup>	60,7 <sup>1)</sup>	nur Gabbro					
SMA8-Gra	Granodiorit-Gesteinsk.		9,7	15,5 <sup>1)</sup>	19 <sup>1)</sup>	55,5 <sup>1)</sup>	nur Granodiorith					
SMA8-0e	Soll-Variante (Styrelf)	7,4	7,6	15	15	10	52	0	0	0	0	0,4
SMA8-B1	mit 25/55-55A (Caribit)											
SMA8-B2	mit 25/55-55A (Olexobit)											
SMA8-B3	mit 25/55-55A RC (Styrelf)											
SMA8-B4	mit 50/70											
SMA8-B5	mit 10/40-65 A											
SMA8-W1	25/55-55A + 1,5% Sasobit											
SMA8-W2	25/55-55A + 3,0% Sasobit											
SMA8-KH	+2 % Kalkhydrat		5,6									
SMA8-GN	50/70+5% Gummi (nass)		7,6									
SMA8-GT	50/70+5% Gummi (trock.)											
S-MZ0,5	halbe Mischzeit											
SMA8-MZ2	doppelte Mischzeit											
SMA8-MT1	Mischtemperatur 120 °C											
SMA8-MT2	Mischtemperatur 170 °C											
SMA8-L1	5 h Lagerung (145 °C)											
SMA8-L2	18 h Lagerung (145 °C)											

<sup>1)</sup>ungewaschene Gesteinskörnung

### 3.5.1.5. Gussasphalt MA 8 S

Die 19 untersuchten Gussasphaltvariationen basieren auf der in Tabelle 12 zusammengestellten Rezeptur. Die davon ausgehenden Variationen sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

**Tabelle 12: Erstprüfung MA 8 S**

<b>Gesteinskörnungsgemisch</b>	
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [%]
11,2	100,0
8	95,0
5,6	83,0
2	54,9
1	48,0
0,25	33,3
0,125	29,7
0,063	25,8

<b>Bindemittel</b>	
Bindemittelsorte	30/45 + 2 % viskositätsverändernder Zusatz (Sasobit)
Bindemittelgehalt	7,3 %

**Tabelle 13: Untersuchte MA 8 S-Variationen**

Bezeichnung	Art der Variation	Bindemittel	Bindemittelgehalt <sup>1)</sup>	Gesteinskörnungen (Art und Anteil)							
				Kalkstein-Füller	Basalt-Füller	Basalt 0/2(BS) <sup>1)</sup>	Natursand 0/2 (NS)	Basalt 1/3 <sup>1)</sup>	Basalt 2/5	Basalt 5/8	Basalt 8/11
MA8-0	Ausgangsmischgut	30/45	7,3	17	10	11	11	14	20	12	5
MA8-B	verringertes B (7,0 %)	+ 2 % S.	7,0								
MA8+B	erhöhter B. (7,6 %)		7,6								
MA8+B2	erhöhter B. (7,9 %)		7,9								
MA8oS	ohne viskositätsv. Zusatz	30/45	7,3								
MA8+S	4 % viskositätsv. Zusatz	30/45 +4% S.									
MA8-W	Bindemittel 50/70	50/70 +2%S.									
MA8-H	Bindemittel 20/30 + 2 % visk. Zusatz	20/30 +2%S.									
MA8-KF	nur Kalksteinfüller	30/45		27	0						
MA8-BF	nur Basaltfüller	+ 2 % S		0	27						
MA8-0b	Wiederholung Ausgangsm.			17	10						
MA8-F	weniger Feinanteil			20	0	13	13	17	19	12	6
MA8+F	erhöhter feinanteil			22	10	8	8	15	20	12	5
MA8-BS	nur Brechsand			15	11	18	0	27	15	9	5
MA8-NS	nur Natursand			18	12	0	25	3	20	15	7
MA8+BH	erhöhter B., Bindemittel 20/30	20/30 +2%S.	7,6	22	5	11	11	14	20	12	5
MA8-R	Referenz-Mischzeit.	30/45									
MA8-60	Mischzeit 60 min	+ 2 % S.									
MA8-240	Mischzeit 240 min										

<sup>1)</sup>ungewaschene Gesteinskörnung;  
 S.: viskositätsverändernder Zusatz Sasobit

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Ergebnisse der Voruntersuchungen

#### 4.1.1. Bestimmung der Masseveränderung der Gesteinskörnungen während der Thermoanalyse

An den zur Herstellung der Asphaltmischgutproben im Labor verwendeten Gesteinskörnungen wurde zum Teil mehrfach während der Projektbearbeitung die Masseveränderung bestimmt. Die bestimmten Masseveränderungen sind in Tabelle 14 zusammengestellt.

Insbesondere die Gesteinskörnungen aus Basalt, welche für die Asphaltuntersuchungen als Hauptgestein verwendet wurde, weisen Masseverluste zwischen 0,68 % und 2,36 % auf. Weiterhin können bei einigen Lieferkörnungen dieser Gesteinsart erhebliche Streuungen der ermittelten Masseverluste festgestellt werden. So weisen die an vier verschiedenen Zeitpunkten an der Lieferkörnung 22/32 untersuchten Gesteinsproben Masseverluste zwischen 0,68 % und 2,20 % auf. Die an verschiedenen Basalt-Gesteinskörnungen an verschiedenen Zeitpunkten erfassten Masseänderungen weisen Standardabweichungen von bis zu 0,48 % (absolut) auf. Da dieser Wert für die Korrektur des Bindemittelgehaltes verwendet wird, wird eine geringe Präzision der Bindemittelgehaltsbestimmung erwartet.

Die weiteren untersuchten Gesteinskörnungen (Granodiorit, Gabbro, Kalkstein) weisen im Vergleich zum untersuchten Basalt deutlich geringere Masseverlust auf.

**Tabelle 14: Masseveränderungen der Gesteinskörnungen**

Gesteinsart	Lieferkörnung	Masseverlust infolge Thermoanalyse [%]		
		Einzelwerte	Mittelwert	Standardabweichung
Basalt (1)	0/2	2,36 / 2,10 / 2,00 / 1,8	2,1	0,23
	1/3	1,24 / 1,50 / 0,81 / 0,74	1,25	0,18
	2/5	0,81 / 0,84 / 1,30 / (2,40)	0,98	0,27
	5/8	1,08 / 1,03 / 1,30 / 1,40	1,20	0,18
	8/11	1,75 / 1,80 / 1,40 / 1,40	1,59	0,22
	11/16	0,89 / 0,82 / 1,50 / 1,20	1,10	0,31
	16/22	2,07 / 1,99 / 1,50 / 2,20	1,94	0,31
	22/32	0,68 / 1,64 / 1,10 / (2,20)	1,14	0,48
	Füller	1,51 / 0,9 / 0,9	1,10	0,35
Natursand	0/2	0,15 / 0,6 / 0,6	0,45	0,26
Granodiorit	0/2	0,71		
	2/5	0,3		
	5/8	0,11		
Gabbro	0/2	0,80		
	2/5	0,45		
	5/8	0,32		
Oolith	0/22	0,32		
Kalkstein	Füller	0,0		

#### 4.1.2. Ergebnisse der Thermoanalyse an den Asphaltgranulatproben

Im Labor wurden einige Varianten der Asphalttragschicht- und Asphaltbinderproben mit Asphaltgranulatzugabe hergestellt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden bei einigen Asphaltmischungen auch der Masseverlust von jeweils einer Probe des verwendeten Asphaltgranulates mittels Thermoanalyse bestimmt. Insbesondere die Ergebnisse der Masseverluste für die

Proben AG1, AG2 und AG4 weisen große Spannweiten bis 0,8 % auf, was auf hohe Inhomogenität der Proben hinweist. Weiterhin weichen die ermittelten Masseverluste zum Teil erheblich von den an jeweils einer Einzelprobe mittels Extraktionsanalyse bestimmten Bindemittelgehalt (vgl. Tabelle 3) ab. Zum Teil enthält diese Abweichung den Masseverlust der im Asphaltgranulat enthaltenen Gesteinskörnungen. Insbesondere die Abweichungen für die Asphaltgranulatproben AG 2 und AG 4 ermittelten Differenzen liegen im Bereich der für das Basaltgestein bestimmten Kalibrierwerte. Bei Asphaltgranulatprobe AG 1 ist der mittels Thermoanalyse bestimmte Masseverlust jedoch kleiner als der mittels Extraktionsanalyse einige Zeit zuvor bestimmte Bindemittelgehalt. Da die Rezeptur der Asphaltvarianten auf den in Extraktionsversuchen ermittelten Bindemittelgehalten beruht, sind Abweichungen in den erreichten Bindemittelgehalten der Asphaltmischgutvariante insbesondere bei Proben mit AG 1 zu erwarten.

**Tabelle 15: Mittels Thermoanalyse bestimmte Masseverluste an Teilproben der verwendeten Asphaltgranulate**

Masseverlust [%]	Asphaltgranulatprobe			
	AG 1	AG 2	AG 3	AG 4
Einzelwerte	4,0	3,9	6,4	5,7
	4,8	4,1	6,5	6,3
	4,8	4,2	6,5	6,5
		4,3		6,5
		4,5		
		4,6		
		4,6		
<b>Mittelwert</b>	<b>4,7</b>	<b>4,3</b>	<b>6,5</b>	<b>6,3</b>
Standardabweichung	0,44	0,27	0,06	0,38
Spannweite	0,8	0,7	0,1	0,8
Bindemittelgehalt (Extraktionsanalyse - Einzelwert)	5,4	3,0	4,5	5,4
Differenz (Masseverlust – B <sub>extr.</sub> )	-0,9	1,3	2,0	0,9

#### 4.1.3. Masseveränderung von Gesteinskörnungen

An vier Gesteinsproben sowie einer Asphaltgranulatprobe wurden testweise thermogravimetrische Analysen (TGA) durchgeführt. Dabei wird eine Gesteinsprobe per Mörser zermahlen und in geringen mg-Mengen in einen Brenntiegel gefüllt. Bei einer konstanten Temperaturerhöhung von 10 K/min wird die Probe erwärmt. Während des Erwärmungsvorgangs wird die Masseänderung der Probe aufgezeichnet.

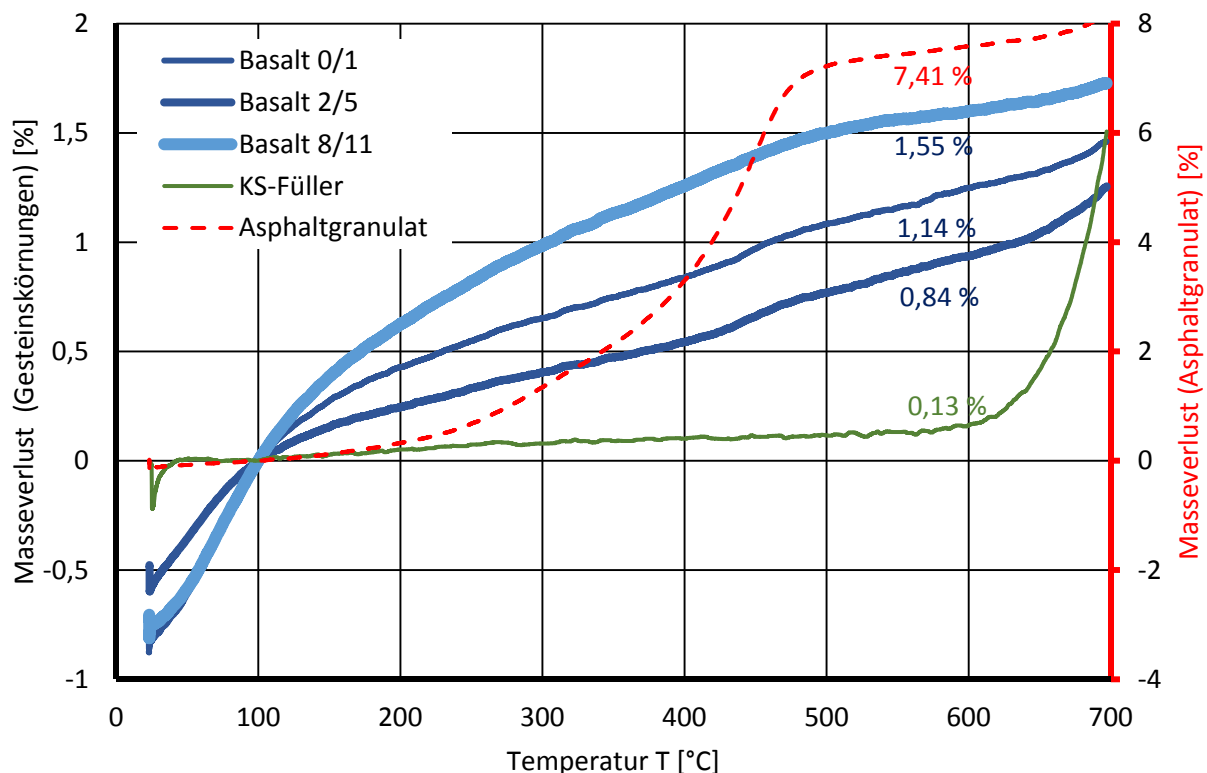
Die an Proben aus drei Basalt-Lieferkörnungen, Kalksteinfüller sowie einem Asphaltgranulat gemessenen Verläufe der Masseverluste sind in Abbildung 9 dargestellt. Für den Masseverlust der Asphaltgranulatprobe wurde eine zweite Ordinate verwendet. Alle gemessenen Masseänderungen wurden auf die bei 110 °C gemessene Masse bezogen, da diese Temperatur die in der Thermoanalyse verwendete Temperatur der ofengetrockneten Proben repräsentiert. Masseänderungen unterhalb von 110 °C weisen auf das Vorhandensein von Feuchtigkeit in der Ausgangsprobe hin.

An der Kalksteinfüllerprobe ist zu erkennen, dass dieses Gestein zunächst eine sehr geringe Masseveränderung aufweist. Erst oberhalb der Temperatur von 600 °C tritt ein zügig verlaufender Masseverlust auf. Dieser ist bei Calciumcarbonat-Füller auf die Reduktion von Kohlendioxid zu Calciumoxid zurück zu führen.

Die drei untersuchten Basaltproben weisen einen relativ gleichmäßig ansteigenden Masseverlust auf unterschiedlichem Niveau auf. Bei einer Temperatur von 540 °C erreichen die drei Proben Masseverluste, welche im Bereich der mittels Thermoanalyse an größerer Probemengen bestimmten Werte (vgl. Tabelle 14) liegen. Hierbei ist keine einzelne Temperatur zu erkennen, bei der eine signifikante Veränderung des Masseverlustes beobachtet werden kann.

Der mit zweiter Ordinate eingezeichnete Verlauf des Masseverlustes der Asphaltgranulatprobe zeigt zunächst bis etwa 200 °C nur einen geringen Masseverlust. Bis zu einer Temperatur von ca. 480 °C deutet dann ein sehr steiler Verlauf des Masseverlustes auf die Verbrennung des Bindemittels in der Probe hin. Oberhalb davon verläuft der Masseverlust wieder vergleichbar mit jenem der Gesteinskörnungen. Ab ca. 620 °C ist dabei ein Wendepunkt im Verlauf des Masseverlustes zu erkennen, was darauf hindeutet, dass das Asphaltgranulat Gesteinskörnungen aus Kalkstein enthält.

Für die Thermoanalyse von Asphaltmischgut bietet sich nach den Messwerten der TGA eine Verbrennungstemperatur an, die zwischen 480 °C und 600 °C liegt, da dadurch zum einen hohe Masseveränderungen infolge mineralogischer Effekte vermieden werden können und zum anderen der überwiegende Anteil des Bitumens verbrannt werden kann.



**Abbildung 9: Masseverlust von Gesteinsproben während der Erwärmung mit 10 K/min, gemessen mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA)**

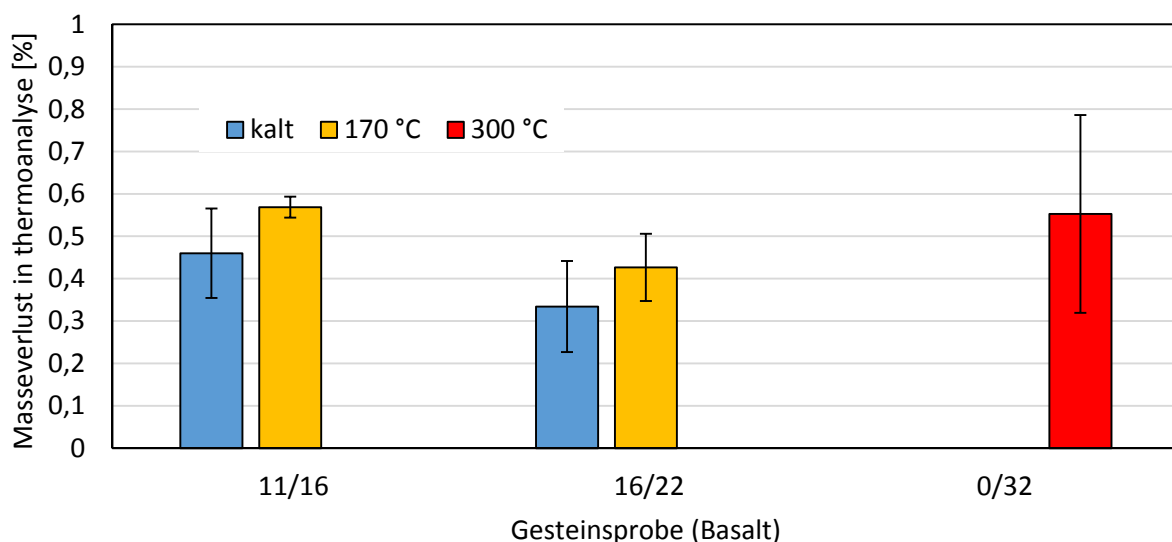
#### 4.1.4. Einfluss der thermischen Beanspruchung der Trockentrommel auf den Masseverlust der Gesteinskörnung

Bei der großtechnischen Herstellung von Asphaltmischgut werden die Gesteinskörnungen in der Trockentrommel durch offene Beflammung getrocknet und auf die für das Mischen erforderliche Temperatur erhitzt. Insbesondere bei Kaltzugabe von Asphaltgranulat erfolgt eine

Überhitzung der Gesteinskörnungen. Wenn der für die Thermoanalyse erforderliche Kalibrierwert bestimmt wird, werden thermisch unbeanspruchte Gesteinskörnungen verwendet. Um zu untersuchen ob durch den Erhitzungsprozess in der Trockentrommel bereits Masseveränderungen an den Gesteinskörnungen auftreten, wurden Gesteinsproben aus den Siebtaschen der Heißabsiebung (Gesteinskörnung 11/16 und 16/22 mit 170 °C) bzw. dem Bypass durch den Mischer ohne Zugabe weiterer Baustoffkomponenten entnommen (wegen AG-Zugabe überhitztes Gesteinskörnungsgemisch 0/32 mit 300 °C) entnommen. Zum gleichen Zeitpunkt wurden thermisch unbeanspruchte Gesteinsproben 11/16 und 16/22 aus den entsprechenden Doseuren entnommen. Eine kalte Probe des 0/32 konnte nicht entnommen werden, da dessen Zusammensetzung durch die Doseure vorgegeben wurden und somit nicht als kaltes Ausgangsgemisch zur Verfügung stand.

Die an den verschiedenen Gesteinsproben bei einer Verbrennungstemperatur von 540 °C gemessenen Masseverluste sind in Abbildung 10 dargestellt. Für die Körnungen 11/16 und 16/22 konnten die Proben gleichen Probenahmedatums für die beiden untersuchten Gesteinstemperaturen verwendet werden. Hier zeigt sich, dass die thermische Beanspruchung der Trockentrommel während der Erwärmung bis auf 170 °C zu keinem geringeren Masseverlust bei anschließender Thermoanalyse führt. Auch für die auf 300 °C erhitze Gesteinsprobe ist kein geringerer Masseverlust als bei den zum gleichen Zeitpunkt verwendeten Körnungen 11/16 und 16/22 zu erkennen. Demzufolge scheint die thermische Belastung in der Trockentrommel nicht zu einer Verringerung des Masseverlustes im Rahmender durchgeführten Thermoanalyse zu führen und es bedarf demnach keiner besonderen Berücksichtigung der thermischen Vorbeanspruchung bei der Anwendung der Thermoanalyse im Rahmen der WPK.

Insgesamt weisen die an diesen Gesteinsproben ermittelten Masseverluste erheblich geringere Werte auf als die im Rahmen der Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Kalibrierwerte untersuchten Gesteinsproben (vgl. Tabelle 14), obwohl beide Proben demselben Steinbruchbetrieb entstammen. Dieser weist jedoch zwei Abbaugebiete auf. Dies kann ursächlich für die großen Unterschiede der ermittelten Masseverluste sein.



**Abbildung 10. Einfluss der Gesteinstemperatur nach Durchlaufen der Trockentrommel auf den mittels Thermoanalyse ermittelten Masseverlust**

#### 4.1.5. Einfluss der Verbrennungstemperatur auf den Masseverlust

Zur weiteren Überprüfung der Variation der in der Thermoanalyse angewendeten Verbrennungstemperatur wurden Teilproben á ca. 10 kg aus zwei großtechnisch im Asphaltmischwerk hergestellten Asphaltmischgutvarianten entnommen. An jeweils zwei Proben wurden Thermoanalysen durchgeführt, wobei die SOLL-Temperatur des Verbrennungsofens zwischen 480 °C und 540 °C variiert wurde. Die ermittelten Masseverluste sind in Abbildung 11 als Mittelwerte dargestellt. Die beiden gemessenen Einzelwerte sind in Form von Fehlertoleranzen eingezeichnet. Die bei verschiedenen Temperaturen erfassten Masseverluste weisen unsystematische Unterschiede in Abhängigkeit von der Temperatur auf, welche im Rahmen der Streuungen der Einzelwerte liegen. Bei den Probe AC 8 ist ein Anstieg des Masseverlustes von ca. 0,2 %/100 K zu erkennen. Diese Systematik ist jedoch bei der Probe AC 16 nicht erkennbar.

Demnach wird an dieser Stelle gefolgert, dass die Temperaturwahl im Bereich zwischen 480 °C und 540 °C keine Auswirkung auf das Ergebnis der Thermoanalyse hat.

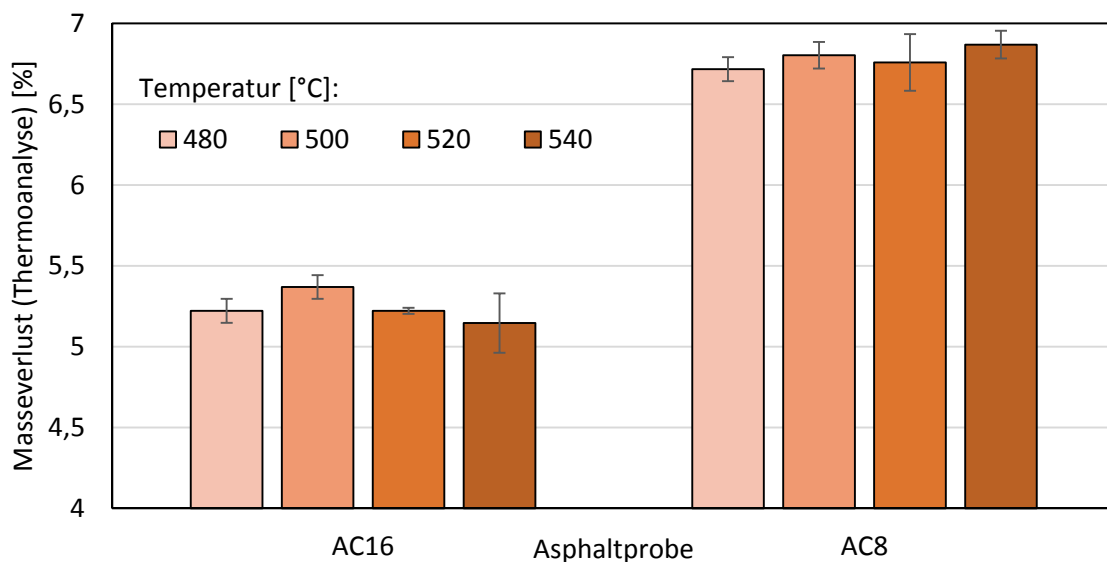


Abbildung 11. Einfluss der Temperatur auf den bei der Thermoanalyse ermittelten Massenverlust

#### 4.1.6. Temperaturverlauf während der Thermoanalyse

Zur Überprüfung der Temperatur in dem für die Thermoanalyse verwendeten Ofens wurde der Temperaturverlauf während der Versuchsdurchführung gemessen, siehe Abbildung 12.

Innerhalb einer Gesteinsprobe ist während der halbstündigen Thermoanalyse eine gleichmäßige Zunahme der Temperatur zu beobachten, wobei die angestrebte Temperatur von 540 °C innerhalb der Zeitspanne von 30 Minuten nicht erreicht wird.

Die in Asphaltproben gemessenen Temperaturverläufe zeigen zu Beginn einem der Gesteinskörnungen ähnlichen Verlauf, wobei die Gussasphaltprobe aufgrund der höheren Herstellungstemperatur auf einem höheren Temperaturniveau beginnt. Bei Temperaturen um 400 °C (beim Gussasphalt 440°C) steigen die in den Asphaltproben gemessenen Temperaturen stark an und erreichen nach ca. 15 Minuten Temperaturen, welche über der angestrebten Soll-Temperatur (hier: 500 °C) liegen. Die Entflammung des Bindemittels führt zu einer deutlichen Temperaturerhöhung, wobei auch Temperaturen über 600 °C erreicht werden können. Im weiteren



Verlauf der Thermoanalyse sinkt die Temperatur wieder ab und regelt sich bei der angestrebten Soll-Temperatur ein. Hierbei scheint der Thermoofen die Temperaturzufuhr abzuregeln, wie der Temperaturverlauf der Gussasphaltprobe zeigt.

Um trotz der Entflammung des Bindemittels während der Thermoanalyse eine übermäßige thermische Beanspruchung der Gesteinskörnungen zu vermeiden, wird daher im Folgenden für die Bindemittelgehaltsbestimmung von Asphalt eine Soll-Temperatur von 500 °C angewendet. Um die zusätzliche Erwärmung der Gesteinskörnungen infolge Bindemittel-Entflammung zu berücksichtigen, werden jedoch die Kalibrierwerte der Gesteinskörnungen bei erhöhter Temperatur von 540 °C ermittelt. Trotz gemessenen Temperaturen von über 600 °C ist zu erwarten, dass die Kerntemperatur der Gesteinskörnungen aufgrund der hohen Temperaturkapazität die angestrebte Temperatur nicht übermäßig überschreitet, was z. B. bei Kalkstein erhöhte Masseverluste zur Folge hätte.

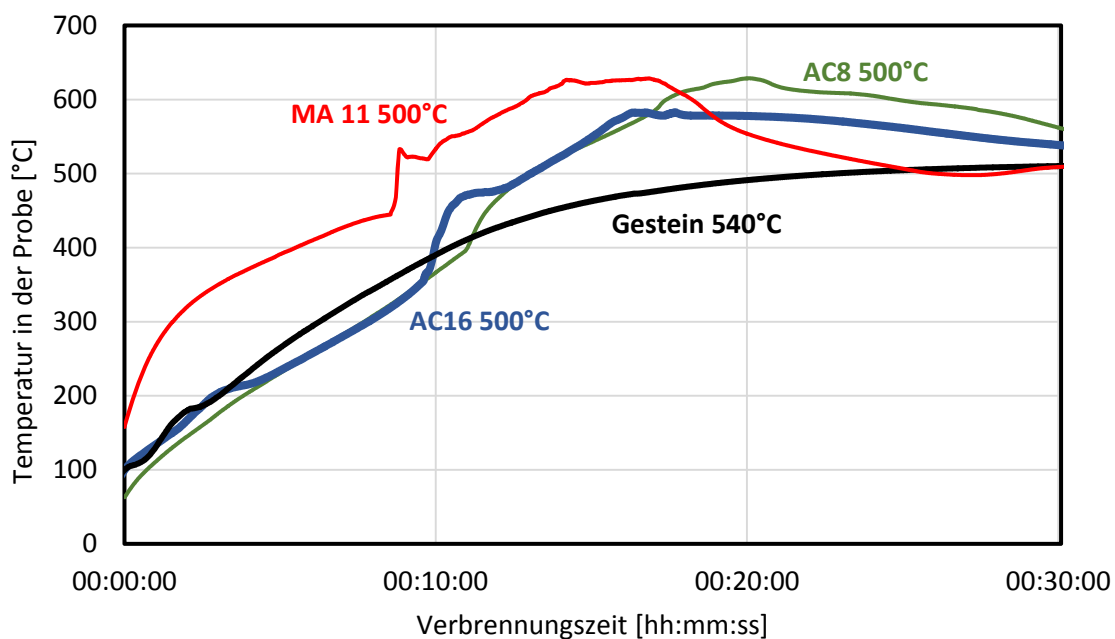


Abbildung 12. Temperaturverlauf während der Thermoanalyse an verschiedenen Proben

## 4.2. Ergebnisse der lösemittelfreien Asphaltanalyse an Labormischungen

### 4.2.1. AC 22 TS

Insgesamt wurden 26 Asphaltbetone für Asphalttragschichten der Sorte AC 22 T S im Labor hergestellt und mittels der beschriebenen Prüfverfahren untersucht. Im Detail sind alle Ergebnisse im Anhang tabellarisch zusammengestellt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach den gezielt variierten Asphalteigenschaften gegliedert zusammengefasst.

#### 4.2.1.1. Variation des Bindemittelgehaltes

Die AC 22 T S-Varianten wurden mit einem Soll-Bindemittelgehalt von 4,2 % hergestellt. Bei jeweils zwei Asphaltmischungen wurden gezielt der Bindemittelgehalt um  $\pm 0,6$  %, entsprechend der zulässigen Toleranzen gemäß DIN EN 12697-21 verändert, vgl. Tabelle 1. Die mittels Thermoanalyse an den Asphalttragschichtvarianten ohne Asphaltgranulatzugabe gemessenen Bindemittelgehalte sind in Abbildung 13 dargestellt.

Tatsächlich fallen die rot eingefärbten Varianten, bei denen der Bindemittelgehalt variiert wurde auch durch geringe bzw. hohe Bindemittelgehalte auf. Jedoch weisen die mit einem Soll-Bindemittelgehalt hergestellten Asphaltvarianten ebenso stark abweichende Bindemittelgehalte auf. Der mittlere mittels Thermoanalyse an den 14 Asphaltvarianten mit Soll-Bindemittelgehalt bestimmte Bindemittelgehalt beträgt 3,89 % bei einer Standardabweichung von 0,41 %. Somit wird der Bindemittelgehalt im Mittel um 0,31 % unterschätzt.

Bei zehn Asphalttragschichtvarianten wurde zusätzlich der Bindemittelgehalt durch Heißextraktion gemäß TP Asphalt-StB, Teil 1 (Differenzenverfahren) bestimmt. Auch hier sind Abweichungen von den angestrebten Bindemittelgehalten zu erkennen, die in einem mittleren Bindemittelgehalt der Soll-Varianten von 3,92 % resultieren. Eine mögliche Ursache für die großen Abweichungen kann in der Entmischung während der Probenteilung liegen. So weisen auch die mittels Extraktionsanalyse bestimmten Bindemittelgehalte im Mittel um 0,3 % geringere Werte auf als die angestrebten Werte. Tendenziell zeigen die Ergebnisse der Thermo- und Extraktionsanalyse vergleichbare Trends.

Hinsichtlich der WPK-Toleranzen weisen die mit geringerer Bindemittelmenge hergestellten Asphaltvarianten (-B und -B2) tatsächlich auch in der Thermoanalyse zu geringe Werte auf. Die zu hohen Bindemittelgehalte der Varianten „+B“ und „+B2“ werden jedoch nicht direkt bestätigt. Allerdings weisen die genannten abweichend zusammengesetzten Mischgutvarianten auch in der Thermoanalyse um 0,6 % geringere (bzw. um 0,4 % höhere) Werte auf als der Mittelwert, der für die Varianten mit Soll-Bindemittelgehalt bestimmt wurde.

Bei den Varianten, welche mit einem tatsächlichen Bindemittelgehalt von 4,2 % hergestellt wurden, zeigen die Varianten „0b“ und „0o1“ Abweichungen im Ergebnis der Thermoanalyse um mehr als  $\pm 0,6$  % und werden demnach fälschlicherweise als nicht-konform identifiziert.

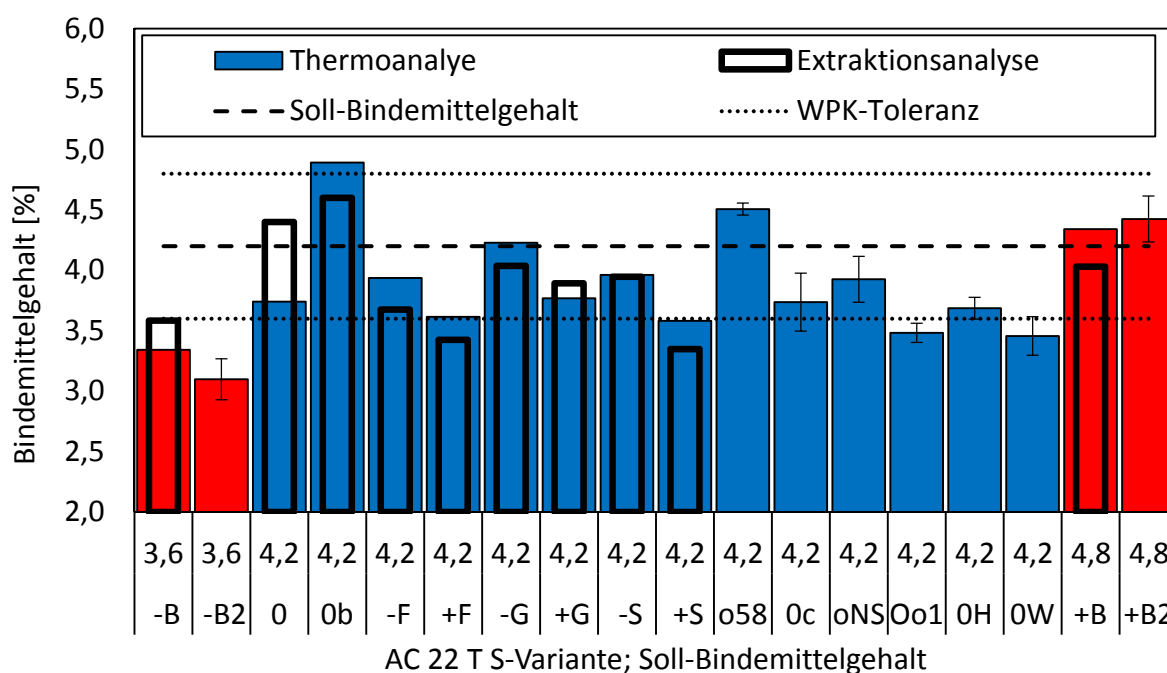
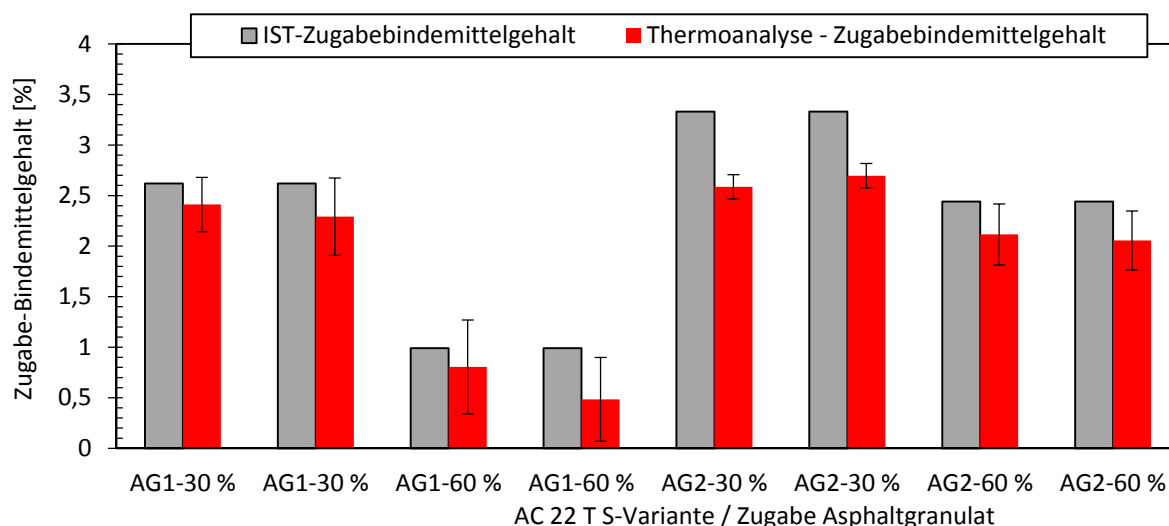


Abbildung 13. Mittels Thermoanalyse gemessene Bindemittelgehalte der AC22-TS-Varianten ohne Asphaltgranulat

Aufgrund der vergleichsweise großen Abweichungen wurden im zweiten Teil des Untersuchungsprogrammes anstelle der Extraktionsanalyse an einer zweiten Probe die Thermoanalyse wiederholt. Für die entsprechenden Asphaltvarianten ohne Ergebnis der Extraktionsanalyse sind in Abbildung 13 die Mittelwerte aus an zwei Teilproben durchgeführten Thermoanalysen dargestellt. Für diese Proben zeigen die Fehlerindikatoren jeweils die Spannweite zwischen den beiden Einzelwerten an. Bei der Doppelbestimmung der insgesamt 16 Varianten, welche auch die Varianten mit AG-Zugabe enthielten, wurden Abweichungen zwischen den beiden Bindemittelgehaltswerte von im Mittel 0,14 % und im größten Fall von 0,25 % identifiziert.

Bei acht Asphaltvarianten wurden zwei Asphaltgranulate in jeweils zwei Zugabeanteilen und zwei Frischbindemitteln zugegeben. Wird bei der Ermittlung des Kalibrierwertes für die Thermoanalyse nach Gleichung 4 das Asphaltgranulat als Gesteinskörnungsanteil betrachtet, ist das im Asphaltgranulat enthaltene Bindemittel Teil des Kalibrierwertes. Dadurch kann mittels Thermoanalyse der Anteil des Zugabebindemittels am hergestellten Mischgut bestimmt werden. Der angestrebte Zugabebindemittelgehalt und der sich aus der Thermoanalyse ergebende Anteil sind in Abbildung 14 dargestellt.

Insgesamt wird der Zugabe-Bindemittelgehalt durch das hier angewendete Verfahren unterschätzt. Die sich aus Schwankungen der am Asphaltgranulat mittels Thermoanalyse gemessenen Masseverluste sind dabei als Fehlerindikatoren zu den Ergebnisbalken des Thermoanalyse-Bindemittelgehaltes ergänzt. Insbesondere bei Zugabe des Asphaltgranulates AG 2 mit einem Anteil von 30 % können die Abweichungen des mittels Thermoanalyse bestimmten Zugabebindemittelgehaltes nicht durch die Schwankungen der AG-Eigenschaften begründet werden.



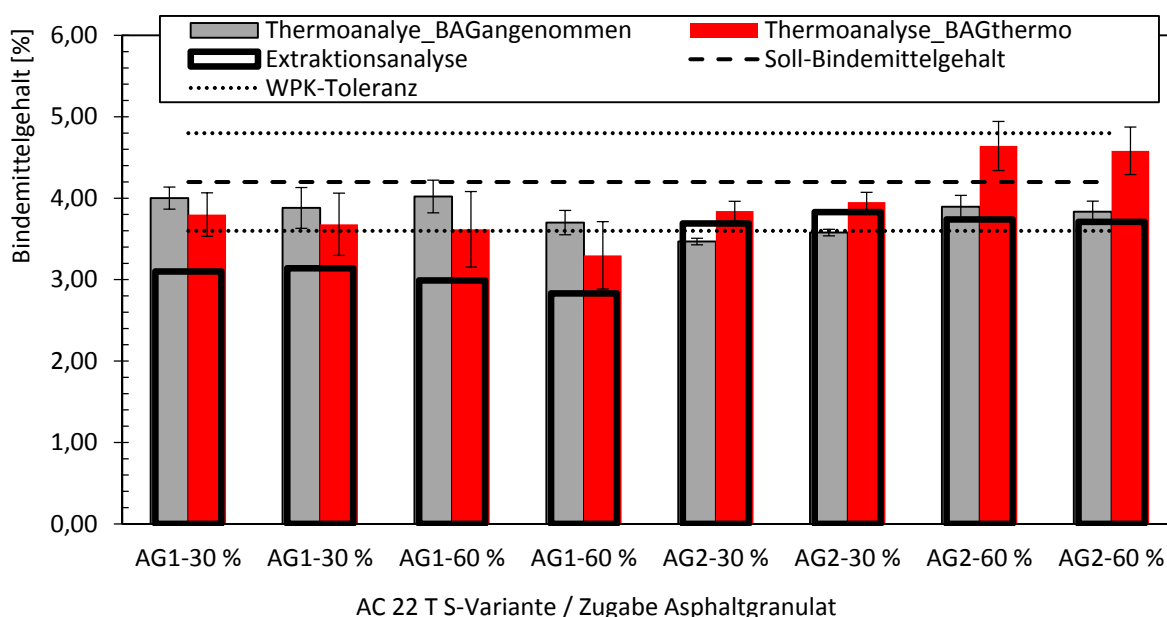
**Abbildung 14. Zugabebindemittelgehalte der AC22TS-Varianten mit Asphaltgranulat und bestimmte Masseverluste unter Berücksichtigung der Masseverluste aller Zugabe-Komponenten**

Die für die Proben mit Asphaltgranulat bestimmten Gesamt-Bindemittelgehalte sind in Abbildung 15 dargestellt. Zunächst ist anhand der Ergebnisse der Extraktionsanalysen insbesondere bei den Mischgutvarianten, bei denen das Asphaltgranulat AG1 zugegeben wurde, zu erkennen, dass die gemessenen Bindemittelgehalte deutlich kleiner sind als die angestrebten.

Hier zeigt sich, dass der im Rahmen des Rezeptierens dieser Varianten verwendete Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates offensichtlich zu hoch angesetzt wurde, sodass zu wenig Frischbindemittel zugegeben wurde.

Mittels Thermoanalyse wurden die Bindemittelgehalte auf zwei verschiedene Weisen bestimmt. Ausgehend von dem in der DIN EN 12697-39 beschriebenen Verfahren, bei dem der angenommene und in der Asphaltrezeptur berücksichtigte Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates in die Bestimmung des Kalibrierwertes eingeht, vgl. Gleichung 5, zeigen die grau eingefärbten Balken den resultierenden Bindemittelgehalt. Hierbei beruht der zur Berechnung verwendete Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates auf einer einmaligen Bestimmung mittels Extraktionsanalyse. Wie bereits in Tabelle 15 ersichtlich, ist dieser Wert wahrscheinlich nicht repräsentativ insbesondere für das tatsächlich eingesetzte Asphaltgranulat AG1.

Wird in Gleichung 5 als Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates der mittlere am Asphaltgranulat mittels Thermoanalyse bestimmte Masseverlust eingesetzt, so ergeben sich die in rot dargestellten Bindemittelgehalte. Die eingezeichneten Streubereiche enthalten zum einen die Streuung der mittels Thermoanalyse an zwei Einzelproben bestimmten Masseverluste sowie anteilig gemäß der AG-Zugabe auch die Streuung der Asphaltgranulatproben (vgl. Tabelle 15). Hierbei wird allerdings der Anteil der im Asphaltgranulat enthaltenen Gesteine am Masseverlust nicht berücksichtigt, sodass der angenommene Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates überschätzt wird. Dies führt dazu, dass auch der resultierende Bindemittelgehalt des Asphaltmischgutes mit AG-Zugabe überschätzt wird.



**Abbildung 15. Mittels Thermoanalyse gemessene Bindemittelgehalte der AC22-TS-Varianten mit Asphaltgranulat-Zugabe**

#### 4.2.1.2. Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes

Der Verbrennungsrückstand nach der Thermoanalyse wurde zunächst trocken gesiebt, um die Korngrößenverteilung zu bestimmen. In Abbildung 16 sind die Abweichungen der Siebrückstände für die untersuchten AC 22 T S-Varianten von den Siebrückständen, welche sich für

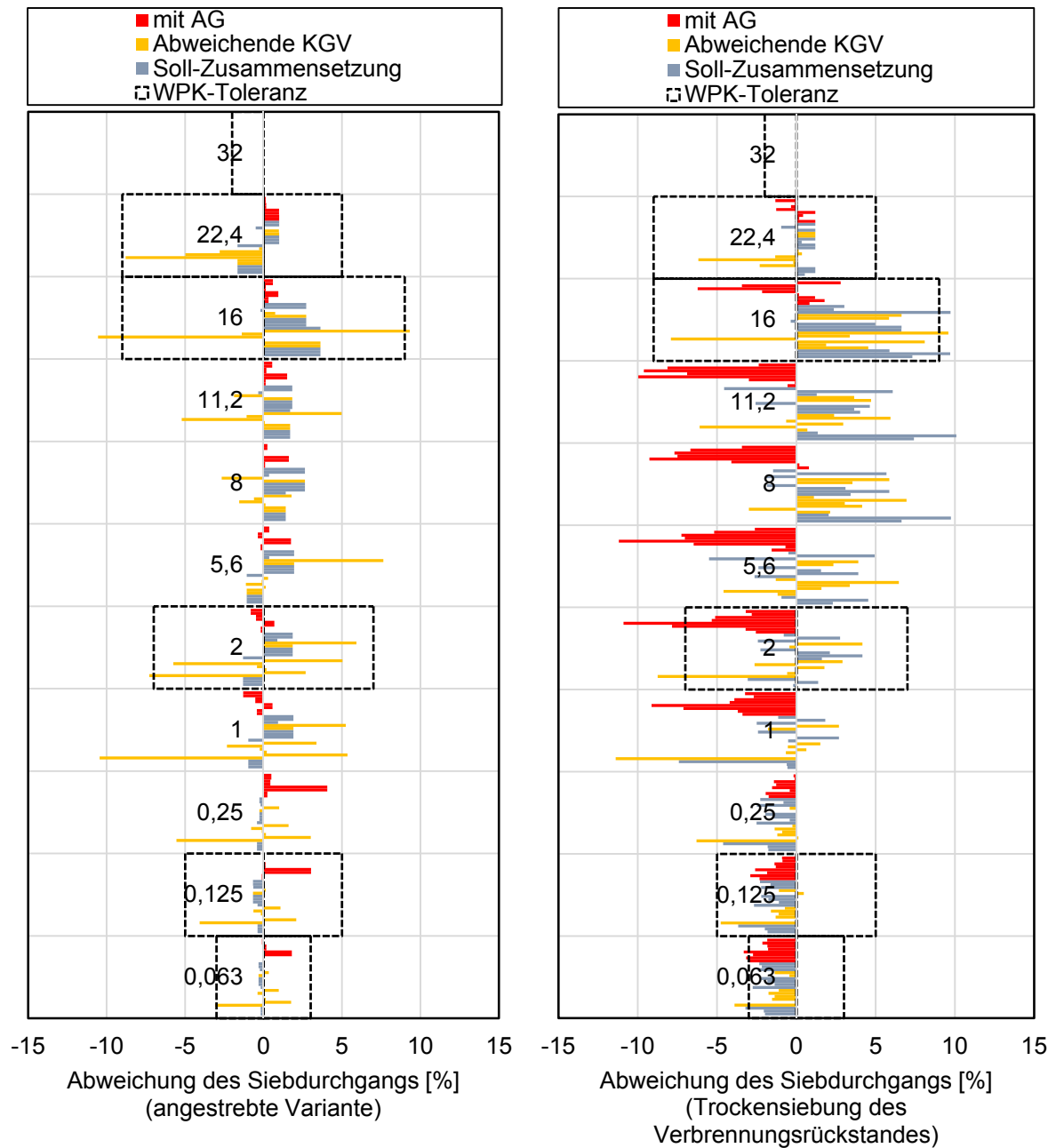
die angestrebte Soll-Zusammensetzung ergeben, dargestellt. Links sind die gemäß der verschiedenen Soll-Rezepturen resultierenden Abweichungen gezeigt. Die Zusammensetzungen, welche der Soll-Zusammensetzung entsprechen sollen, sind blau eingefärbt. Die Varianten, in denen bewusst Variationen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches vorgenommen wurden sind orange, die Varianten mit Asphaltgranulat-Zugabe rot eingefärbt. Weiterhin zeigen die Diagramme die zulässigen Toleranzen gemäß DIN EN 12697-21.

Beim Vergleich der beiden Diagramme wird zunächst deutlich, dass durch die Zugabe von Asphaltgranulat hohe Abweichungen insbesondere in den Siebrückständen nach Trockensieben auftreten. Diese sind auf Unterschiede zwischen den Korngrößenverteilungen der beiden Asphaltgranulate, welche zur Optimierung der Zusammensetzung verwendet wurden, zu jenen, die tatsächlich für die Mischgutherstellung verwendet wurden, zurück zu führen.

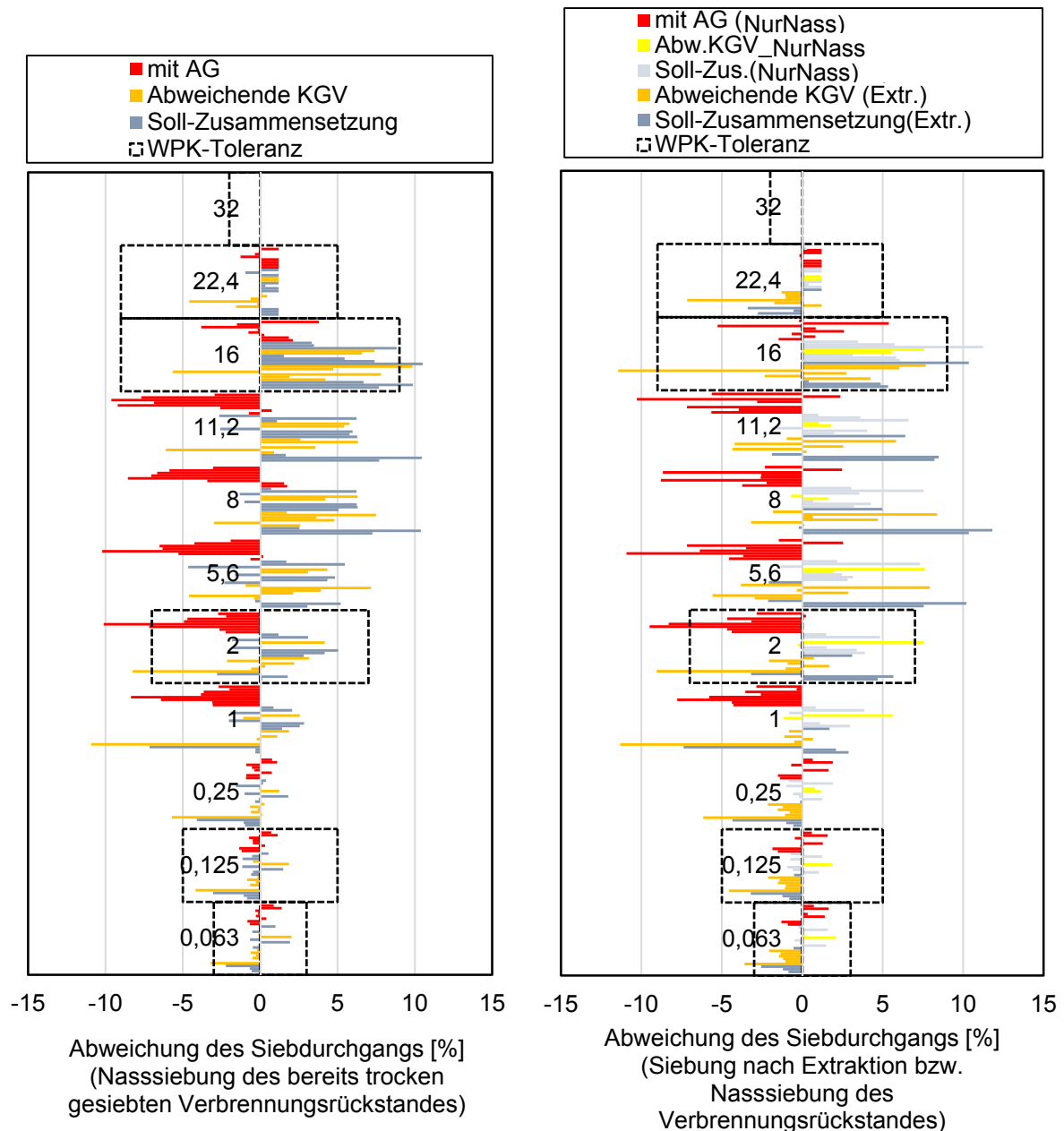
Werden die Asphaltvarianten ohne Asphaltgranulatzugabe betrachtet, so fällt auf, dass nahezu alle Varianten geringere Siebdurchgänge bei den Korngrößen  $< 0,125$  mm aufweisen. So ist insbesondere der Feinanteil des Verbrennungsrückstandes nach Trockensiebung im Mittel um 2,2 % kleiner als der Soll-Feinanteil. Ursache für die geringeren Feinanteile sind Anhaftungen des Gesteinsmehls an groben Gesteinskörnungen, welche durch einfaches Trockensieben nicht gelöst werden konnten.

Im Anschluss an die Trockensiebung wurden die Siebrückstände wieder zusammen gemischt und die Probe wurde einer Nasssiebung unterzogen. Die sich daraus zur Soll-Zusammensetzung ergebenden Abweichungen der Siebdurchgänge sind in Abbildung 17 (links) dargestellt. Wie die im Vergleich zur Trockensiebung (Abbildung 16, rechts) deutlich geringeren Abweichungen der Siebdurchgänge bei den kleinen Siebweiten zeigen, können die Anhaftungen durch Nasssieben gelöst werden.

Weiterhin zeigt Abbildung 17 auf der rechten Seite die in Siebanalysen der Gesteinskörnungen nach Extraktionsanalyse bzw. Nasssiebungen ohne vorherige Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes auftretenden Abweichungen der Siebdurchgänge. Insgesamt sind vergleichbare Abweichungen bei den Nass-Siebungen unabhängig von der vorherigen Trockensiebung zu erkennen. Auch die Siebanalyse nach Extraktion des Bindemittels weist vergleichbare Abweichungen auf wie die Nasssiebanalyse des Verbrennungsrückstandes.



**Abbildung 16. Abweichungen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches; links: angestrebte Abweichungen; rechts: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes**



**Abbildung 17. Abweichungen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches; links: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Nasssiebung des bereits trocken gesiebten Verbrennungsrückstandes; rechts: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Extraktionsanalyse bzw. bei direkter Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes**

In Tabelle 16 sind die Asphaltvarianten zusammengestellt, deren angestrebte Zusammensetzung über die WPK-Toleranz hinausgehende Abweichungen der Korngrößenverteilung aufwiesen. Für drei dieser vier Varianten können die Abweichungen auch durch Siebanalysen (sowohl Trocken- als auch Nasssiebung) des Verbrennungsrückstandes identifiziert werden. Bei Variante AC22+G mit einem um 10,5 % geringeren Siebdurchgang bei 16 mm sind die in den Siebanalysen des Verbrennungsrückstandes ermittelten Abweichungen geringer und innerhalb der WPK-Toleranz.

**Tabelle 16: Als nicht-konform gemäß DIN EN 13108-21 eingestufte Korngrößenverteilungen der AC 22 T S-Varianten (Soll-Zusammensetzung, sowie Trocken- bzw. Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes nach Thermoanalyse)**

IST	Tatsächliche Abweichungen der Korngrößenverteilung	Durch Siebanalyse des Verbrennungsrückstands bestimmte Nicht-konforme KGV	
		Trockensiebung	Nasssiebung
nicht-konform	AC22-F (Siebdurchgang < 0,063 mm: -3,1 %)	ja (-3,9 %)	ja (-3,2 %)
	AC22-F (Siebdurchgang < 2 mm: -7,3 %)	ja (-8,7 %)	ja (-8,2 %)
	AC22+G (Siebdurchgang < 16 mm: -10,5 %)	<b>nein (-7,9 %)</b>	<b>nein (-5,6 %)</b>
	AC22+S (Siebdurchgang < 16 mm: +9,3 %)	ja (+9,6 %)	ja (+9,8 %)
konform	AC22-B (Siebdurchgang < 16 mm: +3,6 %)	<b>ja (+9,7 %)</b>	<b>ja (+9,9 %)</b>
	AC22-0b (Siebdurchgang < 16 mm: +3,6 %)	nein (6,6 %)	<b>ja (+10,5 %)</b> <sup>1</sup>
	AC22-o58 (Siebdurchgang < 2 mm: +5,9 %)	nein (+4,2 %)	<b>ja (+7,6 %)</b> <sup>2</sup>
	AC22-Oo (Siebdurchgang < 16 mm: -0,2 %)	<b>ja (+9,7 %)</b>	<b>ja (+11,2 %)</b> <sup>2</sup>
	AC22-AG1a (Siebd. < 0,063 mm: -0,1 %)	<b>ja (-3,0 %)</b>	nein (-0,7 %)
	AC22-AG1b (Siebd. < 0,063 mm: -0,1 %)	<b>ja (-3,2 %)</b>	nein (-0,8 %)
	AC22-AG1c (Siebd. < 2 mm: +0,7 %)	<b>ja (-7,8 %)</b>	<b>ja (-7,2 %)</b>
	AC22-AG1d (Siebd. < 2 mm: +0,7 %)	<b>ja (-10,9 %)</b>	<b>ja (-10,1 %)</b>

<sup>1</sup> an extrahierten Gesteinskörnungen wurde eine Abweichung von +10,4 % bestimmt.  
<sup>2</sup> ohne vorherige Trockensiebung

Weiterhin enthält die Tabelle die Asphaltvarianten, bei denen in Siebanalysen des Verbrennungsrückstandes über die WPK-Toleranzen hinausgehende Abweichungen des Siebdurchgangs festgestellt wurden, obwohl die Asphalte ohne nicht-konforme Abweichungen der Korngrößenverteilung zusammengesetzt wurden. Diese sind zum einen die Varianten AC22-B (geringer Bindemittelgehalt und AC22-0b (Soll-Bindemittelgehalt) sowie die Variante AC22-o58, bei der die 5/8-Körnung nicht zugemischt wurde. Bei allen drei Mischgutproben wurden sowohl in der rechnerischen Zusammensetzung als auch bei der Siebanalyse des Extraktionsrückstandes abweichende (jedoch innerhalb der konformen Toleranz) festgestellt. Ursächlich für die unterschiedliche Ausprägung kann Entmischung bei der Probenzusammensetzung (bei den Varianten AC22-B und AC22-0b wurden nicht aufbereitete Lieferkörnungen verwendet) und bei der Probenteilung des vergleichsweise mageren Asphaltmischgutes (insbesondere AC22-B und AC22-o58) sein. Bei der Variante AC 22-Oo wurde ein Oolith-Kalkstein als Gesteinskörnung verwendet. Hierbei ist eine Kornzerstörung infolge der thermischen Beanspruchung wahrscheinlich ursächlich für die große Abweichungen. Weiterhin weisen die Asphaltvarianten mit Zugabe des Asphaltgranulates AG1 Abweichungen der Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes auf. Bei den Varianten mit 30 % AG-Anteil (AC22-AG1a und -AG1b) wird in der Trockensiebung ein zu geringer Feinanteil identifiziert. Nach der Nasssiebung weisen diese beiden Proben keine Auffälligkeit auf und werden entsprechend als konform identifiziert. Bei den Proben mit 60 % Zugabe des Asphaltgranulates ergeben sich Abweichungen beim Siebdurchgang < 2 mm. Diese werden sowohl bei Trocken- als auch bei Nasssiebung erfasst. Diese Nicht-Konformität ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die für die Rezeptur verwendete Korngrößenverteilung des Asphaltgranulates nicht repräsentativ für die bei den Mischungen eingesetzten Asphaltgranulatproben war.

Somit führte bei insgesamt sieben der 26 untersuchten AC 22 TS-Varianten die Thermoanalyse zu falschen Aussagen der Konformitätskontrolle hinsichtlich der mittels Nasssiebung bestimmten Korngrößenverteilung.



### 4.2.1.3. Verdichtungswiderstand

Aufgrund eines Gerätefehlers konnte der Verdichtungswiderstand nicht für alle Asphaltvarianten bestimmt werden. Für die verbleibenden Varianten zeigt Abbildung 18 die Verdichtungswiderstände T sowie die an den Varianten mit Asphaltgranulat bestimmten Erweichungspunkte. Die den einzelnen Ergebnissen zugeordneten Fehlerindikatoren zeigen die Spannweite der ermittelten Einzelwerte der Verdichtungswiderstände an. Die horizontalen Linien weisen die Wiederholpräzision gemäß TP Asphalt-StB, Teil 10B, bezogen auf die Vergleichsvariante AC22-0b, aus.

Tendenziell kann der Einfluss von Variationen der Mischgutzusammensetzung auf den Verdichtungswiderstand T erkannt werden. So ergibt sich eine plausible Reihung bei der Variation des Bindemittelgehaltes. Allerdings liegen mit Ausnahme von drei Varianten (AC22-0, AC22-G und AC22-AG1d) die Verdichtungswiderstände aller untersuchten Asphalttragschichtvarianten innerhalb der Wiederholpräzision. Somit können die hier durchgeführten Variationen nicht mit statistisch ausreichender Sicherheit anhand des Verdichtungswiderstandes identifiziert werden.

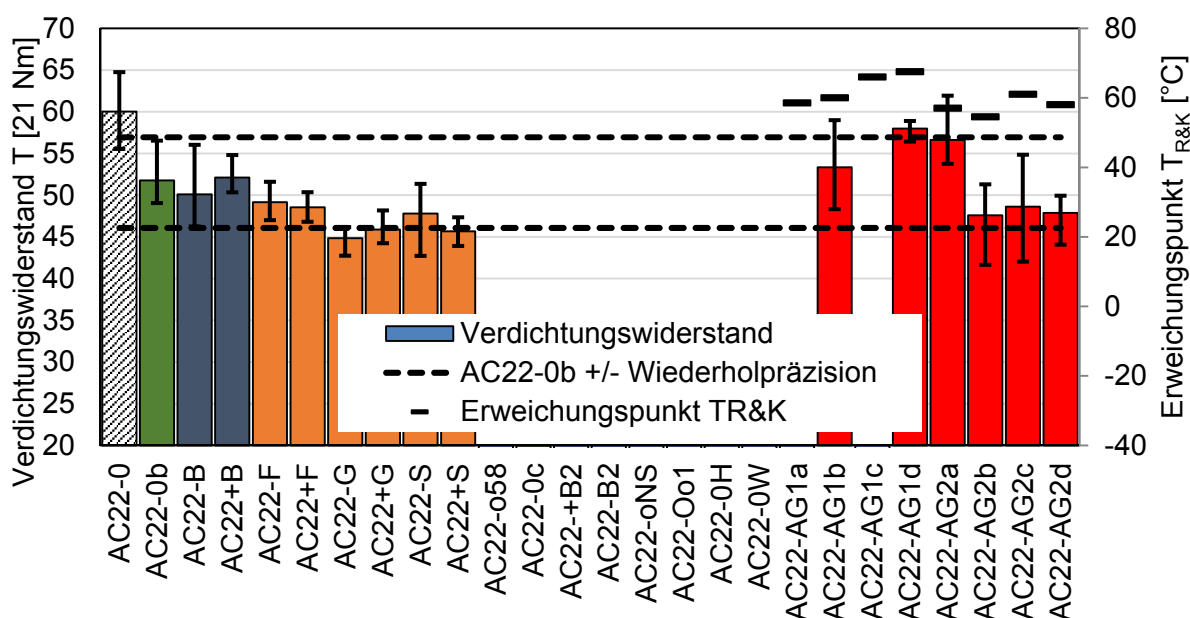
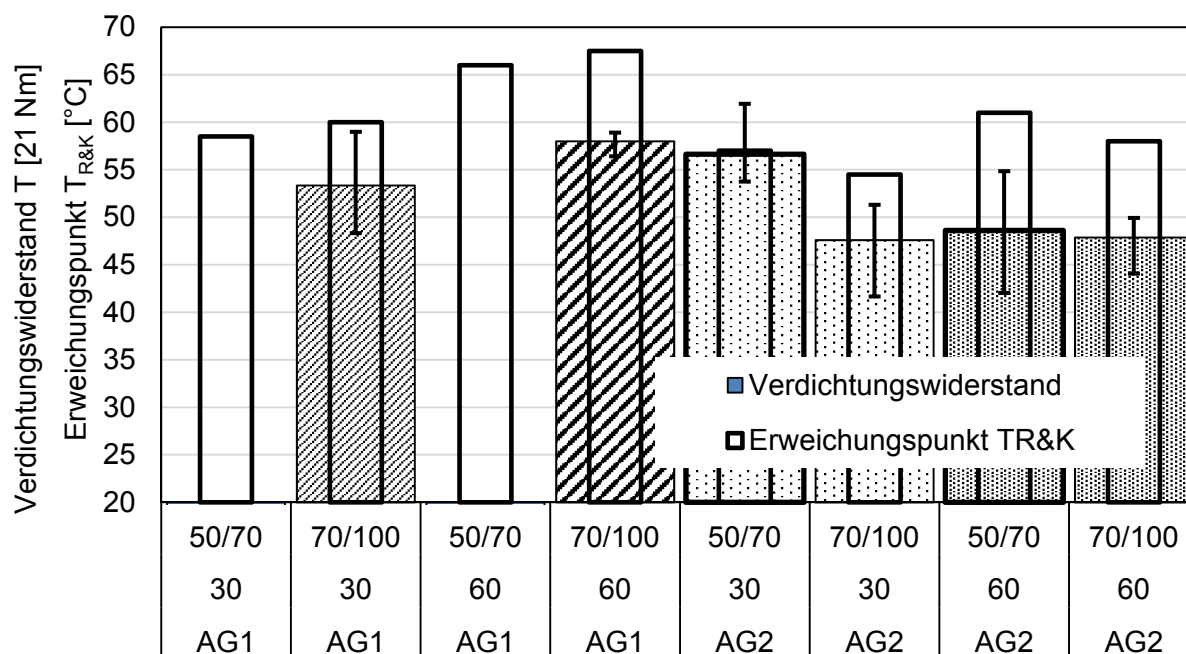


Abbildung 18. An AC22TS-Varianten bestimmte Verdichtungswiderstände T

Für die Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulatzugabe wurde der Erweichungspunkt Ring und Kugel anhand der aus dem Mischgut rückgewonnenen Bindemitteln bestimmt. Hier zeigt der Verdichtungswiderstand tendenziell einen Zusammenhang zum eingesetzten Asphaltgranulat, der AG-Zugabemenge sowie zum eingesetzten Frischbitumen. Dazu zeigt Abbildung 19 die entsprechenden Ergebnisse im Detail. So ist der Einfluss des verwendeten Asphaltgranulates, der zugegebenen Frischbindemittelsorte sowie der AG-Zugabemenge zu erkennen. Allerdings liegen die Unterschiede des Verdichtungswiderstandes jeweils innerhalb der Wiederholpräzision.



**Abbildung 19. Verdichtungswiderstand der AC22TS-Varianten mit Asphaltgranulatzugabe**

#### 4.2.1.4. Hohlraumgehalt von Marshall-Probekörpern

Nach Herstellung der Asphaltvarianten wurden Marshall-Probekörper mit 2 x 50 Schläge verdichtet. An diesen wurden Marshallversuche und Spaltzugversuche durchgeführt. Vor Bestimmung der Marshall-Stabilität und des Fließwertes wurde an drei Probekörpern die Raumdichte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 6, bestimmt. Weiterhin wurde die Mischgutrohndichte nach TP Asphalt-StB, Teil 5 messtechnisch ermittelt. Aus beiden Größen wurde der Hohlraumgehalt berechnet.

Die am den Marshall-Probekörpern bestimmten Hohlraumgehalte sind in Abbildung 20 dargestellt. Die gestrichelte Linie repräsentiert die Wiederholpräzision gemäß TP Asphalt-StB, Teil 9, bezogen auf den Hohlraumgehalt der Vergleichsvariante AC22-0b. Der Hohlraumgehalt reagiert sehr sensibel auf Veränderungen des Gesteinskörnungsgemisches, die im überwiegenden Teil zu einer deutlichen Vergrößerung des Hohlraumgehaltes führen. Ebenso verändert die Variation des Bindemittelgehaltes den Hohlraumgehalt, wobei die zunächst untersuchten Variante AC22-B und AC22+B unplausible Ergebnisse liefern, eine Wiederholung der Untersuchungen (Varianten AC22-Bb und +Bb) zeigt jedoch, dass auch diese Variation zu einer über die Wiederholbarkeit hinausgehenden Veränderung des Hohlraumgehaltes führt. Ursächlich für die unplausiblen Hohlraumgehalte der zunächst hergestellten Variante und auch der Vergleichsvariante AC22-0 liegen vermutlich in Entmischungserscheinungen infolge nicht anforderungsgerecht durchgeführter Probenteilung in Verbindung mit der Verwendung ungewaschener grober Gesteinskörnungen bei der Herstellung der Mischgutvarianten im Labor.

Bei den im Folgenden betrachteten Ergebnissen des Marshall-Versuchs sowie des Spaltzugversuchs, ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse im hohen Maße vom Hohlraumgehalt der jeweiligen Probekörper beeinflusst werden.

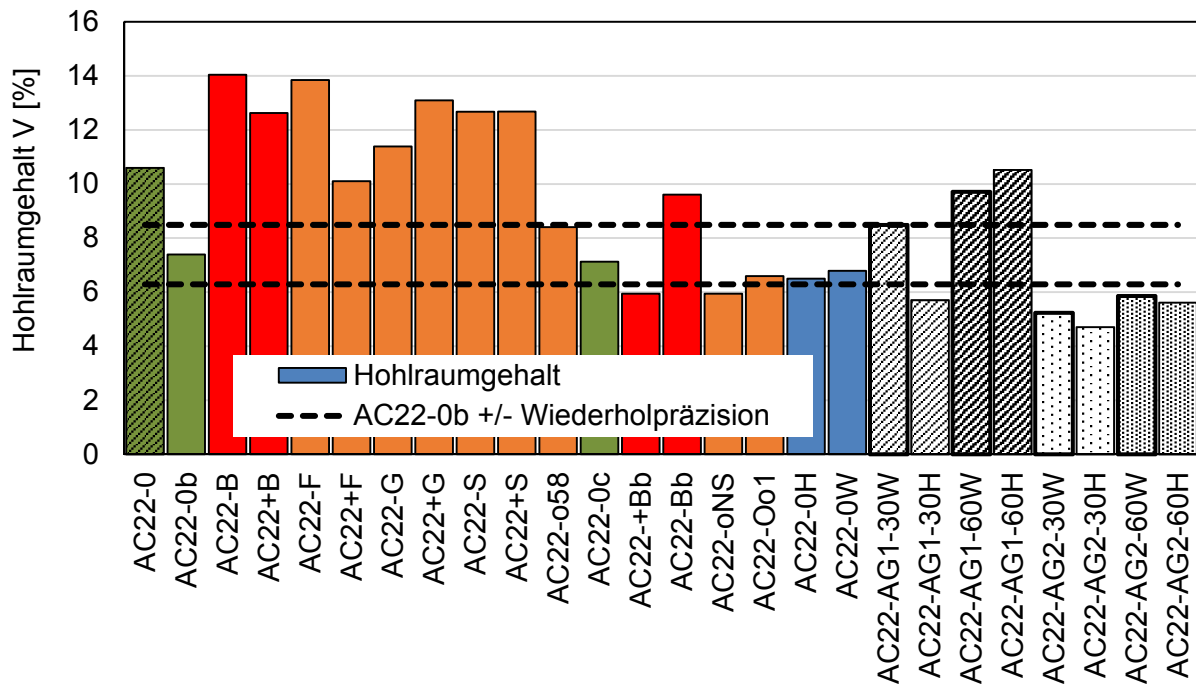


Abbildung 20. An MPK der AC22TS-Varianten bestimmte Hohlraumgehalte

#### 4.2.1.5. Marshall-Stabilität und Fließwert

In Abbildung 21 sind die an AC22TS-Varianten bestimmten Marshall-Stabilitäten dargestellt. Die Spannweiten der jeweils drei ermittelten Einzelwerte sind als Fehlerindikatoren dargestellt. Die horizontalen Linien zeigen die Wiederholpräzision gemäß TP Asphalt-StB, Teil 34, bezogen auf die Vergleichsvarianten AC22-0b für die AC22-Varianten, die mit ungewaschenen Gesteinskörnungen hergestellt wurden und auf Vergleichsvariante AC22-0c für die mit gewaschenen Gesteinskörnungen hergestellten Varianten. Für die Varianten mit Asphaltgranulat sind zusätzlich die an den extrahierten Bindemitteln bestimmten Erweichungspunkte angegeben. In Abbildung 22 sind die entsprechend erfassten Fließwerte dargestellt.

Gegenüber den grün dargestellten Vergleichsvarianten führt die Variation des Bindemittelgehaltes um  $\pm 0,6$  % zu einer plausiblen Reihung der Ergebnisse für Stabilität und Fließwert, die jedoch innerhalb der Wiederholpräzision liegen. Von den Varianten mit variiertem Gesteinskörnungsgemisch (orange) weisen nur die Variante AC22+F (mit erhöhtem Füllergehalt) und AC22-G (mit verringertem Grobkornanteil) über die Wiederholbarkeit hinausgehende Anstiege der Marshall-Stabilität bzw. Varianten AC22-oNS (ohne Natursand) höhere Abweichungen des Fließwertes auf.

Eine Variation der Bindemittelart von 30/45 (Variante AC22-0H) bzw. 70/100 (AC22-0W) anstelle von 50/70 führt zu einer deutlichen plausiblen Veränderung der Marshall-Stabilität, welche die Wiederholpräzision deutlich übertrifft. Hinsichtlich der entsprechenden Fließwerte ergeben sich widersprüchliche Ergebnisse, dass die weichere Bitumensorte eine Verringerung des Fließwertes gegenüber der härteren Bitumensorte ergibt.

Hinsichtlich der Varianten mit Asphaltgranulat führen die höheren AG-Zugabeanteile jeweils zu einer Erhöhung der Stabilitäten und Fließwerte im Vergleich zu den Varianten mit geringerem AG-Anteil.

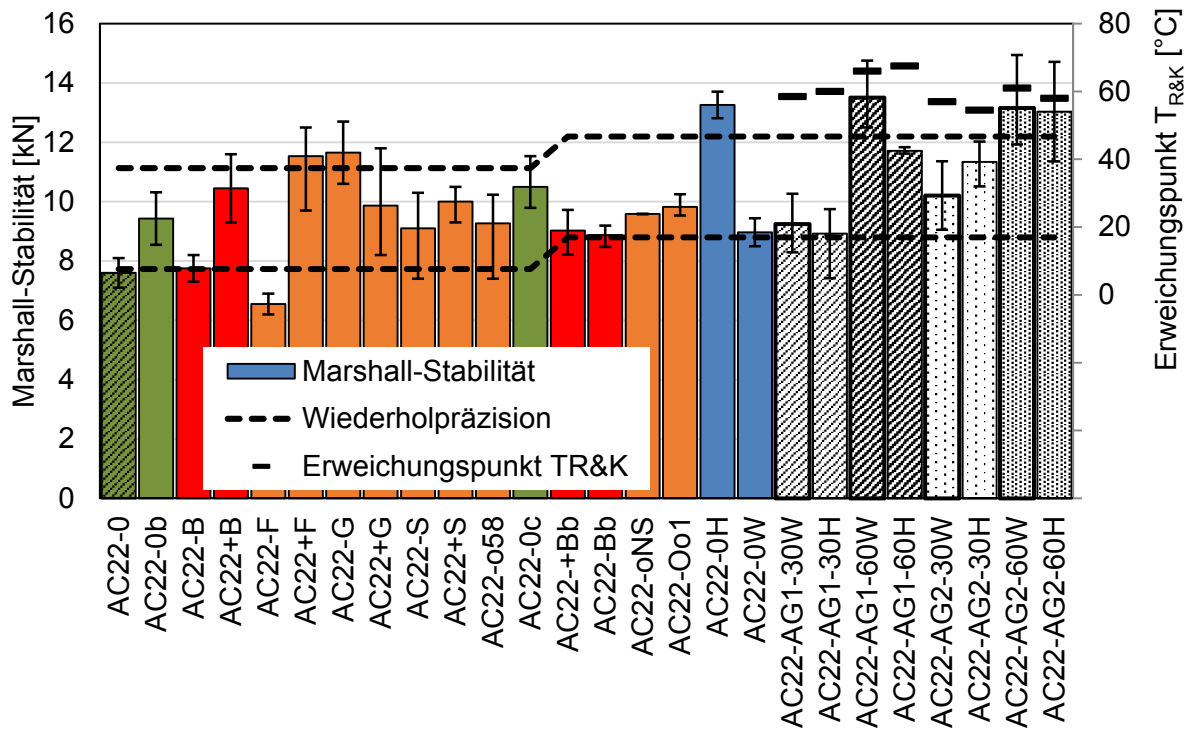


Abbildung 21. An AC22TS-Varianten bestimmte Marshall-Stabilität

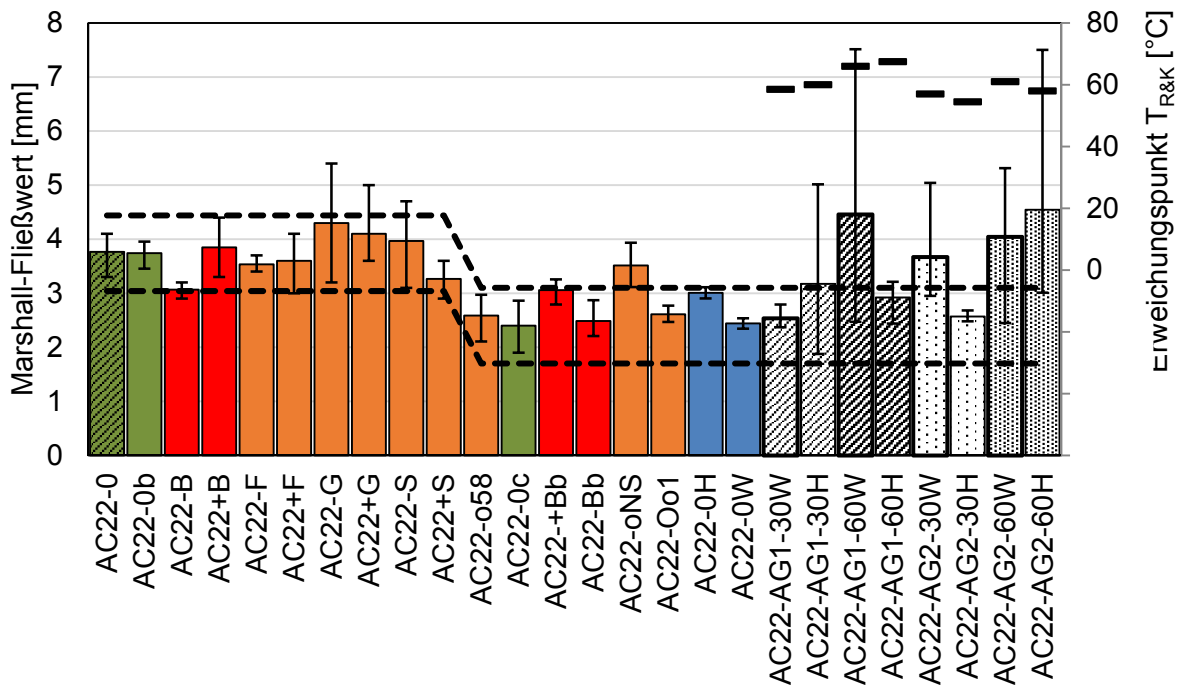


Abbildung 22. An AC22TS-Varianten bestimmter Marshall-Fließwert

#### 4.2.1.6. Ergebnisse der Spaltzugversuche

Die an Marshallprobekörpern der AC22TS-Varianten bestimmten Spaltzugfestigkeiten sind in Abbildung 23 dargestellt. Zur Beurteilung der Wiederholbarkeit sind in den TP Asphalt-StB keine Präzisionswerte angegeben. Daher wurde die mittlere Standardabweichung der je Variante bestimmten drei Spaltzugfestigkeiten berechnet. Als Kennwert der Wiederholpräzision

wurde die mittlere Standardabweichung mit dem Faktor 2,77 multipliziert (vgl. TP Asphalt-StB, Teil 0) und im Diagramm ausgehend von der Vergleichsvarianten AC220-b dargestellt. Entsprechend zeigt Abbildung 24 die bei Kraftmaximum gemessenen Horizontalverformungen und Abbildung 25 die bis zum Kraftmaximum geleistete Verformungsarbeit. Insbesondere die Horizontalverformung weist eine hohe Prüfstreuung auf, sodass die anhand der mittleren Standardabweichung geschätzte Wiederholpräzision den gesamten Messbereich abdeckt.

Die in ihrer Zusammensetzung variierten AC22TS-Varianten weisen Abweichungen von der Vergleichsvariante AC22-0b auf, welche jedoch innerhalb der geschätzten Wiederholbarkeit liegen. Plausibel ist die höhere Spaltzugfestigkeit bei höherem Bindemittelgehalt (Variante AC22+B und +Bb). Die größere Flexibilität führt außerdem zu höherer horizontaler Verformung sowie zu höherer Verformungsarbeit.

Wird die Variation der zugegebenen Bindemittelsorte betrachtet, so zeigen diese im Vergleich zur Variante AC22-0c, die ebenfalls mit gewaschenen Gesteinskörnungen hergestellt wurde, ebenfalls plausible Ergebnisse. Die Zugabe eines härteren Bindemittels (AC22-0H) führt zu höherer Spaltzugfestigkeit und geringerer Horizontalverformung. Bei Zugabe des weicheren Bitumens (AC22-0W) sind die entgegengesetzten Einflüsse zu erkennen. Insgesamt liegen diese Unterschiede jedoch innerhalb der geschätzten Wiederholbarkeit.

Hinsichtlich der Varianten mit Asphaltgranulatzugabe zeigen sich höhere Spaltzugfestigkeiten bei Verwendung von AG2 als bei AG1. Ansonsten weisen die Ergebnisse des Spaltzugversuches nur einen geringen Zusammenhang zum Erweichungspunkt Ring und Kugel auf.

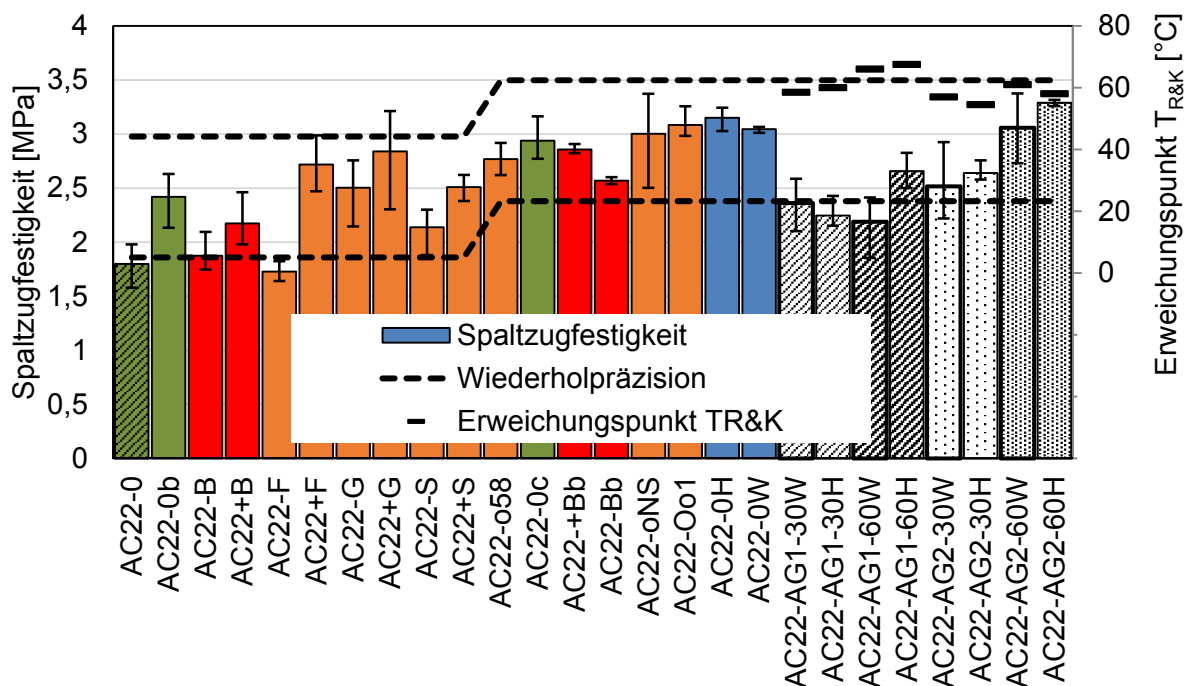


Abbildung 23. An AC22-Varianten ermittelte Spaltzugfestigkeiten

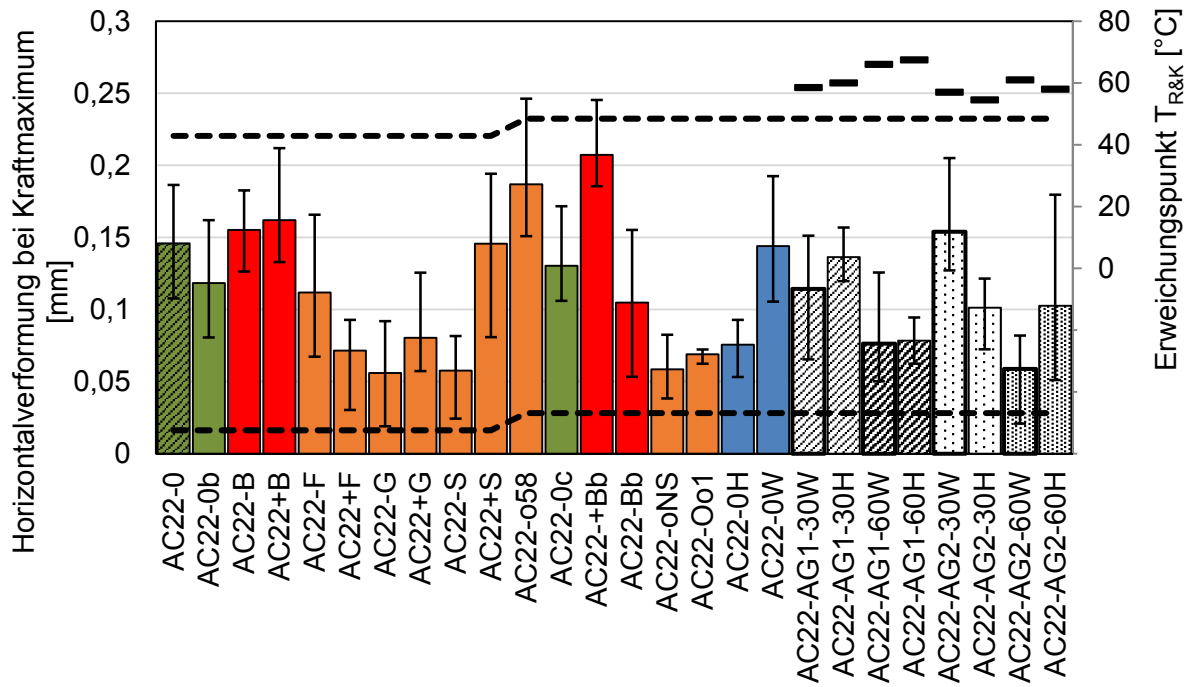


Abbildung 24. In Spaltzugversuchen an AC22-Varianten bestimmte Horizontalverformung bei Kraftmaximum

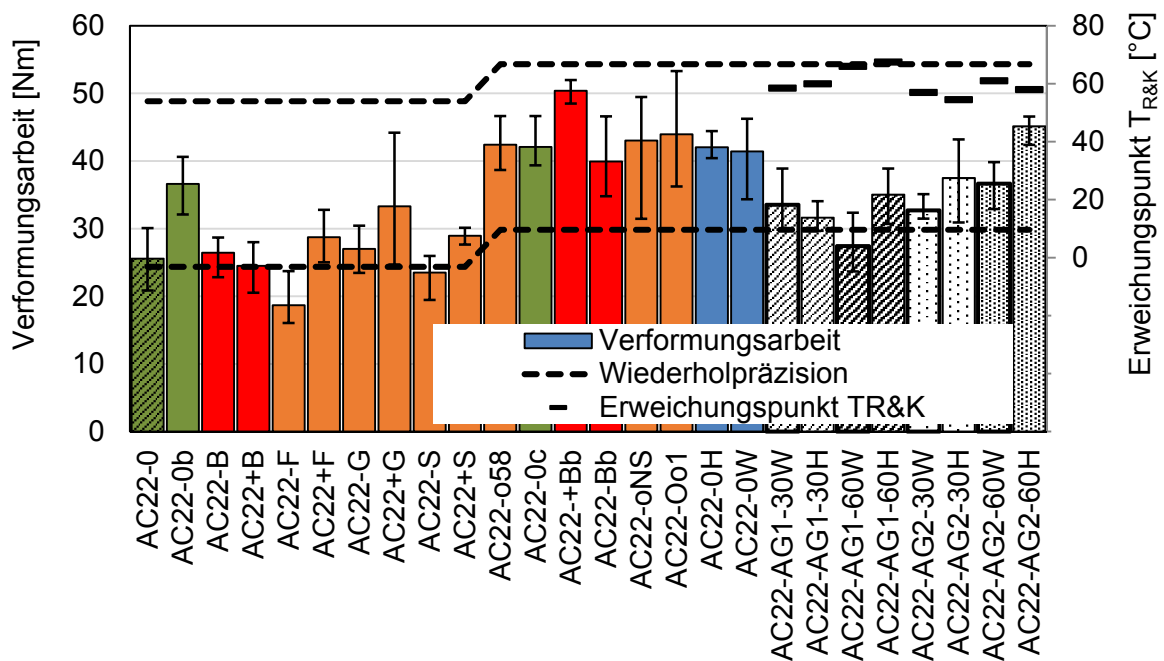


Abbildung 25. Kumulierte Verformungsarbeit bis Kraftmaximum der AC22-Varianten in Spaltzugversuchen

#### 4.2.2. AC 16 B S

Im Folgenden werden die an den Asphaltbindervarianten bestimmten Ergebnisse diskutiert.

##### 4.2.2.1. Bindemittelgehalt

Abbildung 26 zeigt die mittels Thermoanalyse sowie Heißextraktion bestimmten Bindemittelgehalte der Asphaltbinder-Varianten. Mittels Thermoanalyse können die beiden Asphaltbindervarianten mit geringerem Bindemittelgehalt („-B2“ und „-B1“) identifiziert werden. In beiden Fällen liegen die mittels Thermoanalyse gemessenen Bindemittelgehalte unterhalb der zulässigen WPK-Toleranz. Die Ergebnisse der Extraktionsanalyse bestätigen diese geringeren Werte.

Von den insgesamt 22 Asphaltbinder-Varianten mit einem angestrebten Bindemittelgehalt von 4,5 % werden mittels Thermoanalyse bei drei Varianten („-0“, „-D“ und „-3045“) zu geringe Bindemittelgehalte unterhalb der WPK-Toleranz identifiziert. Im Mittel wird bei diesen Asphaltvarianten ein Bindemittelgehalt von 4,27 % bei einer Standardabweichung von 0,40 % bestimmt.

Die beiden mit erhöhtem Bindemittelgehalt hergestellten Asphaltbinder „+B“ und „+B2“ können mittels Thermoanalyse nicht eindeutig identifiziert werden. Anstelle der um +0,3 % und +0,6 % erhöhten Bindemittelgehalte werden lediglich um +0,1 % bzw. +0,3 % erhöhte Bindemittelgehalte erfasst.

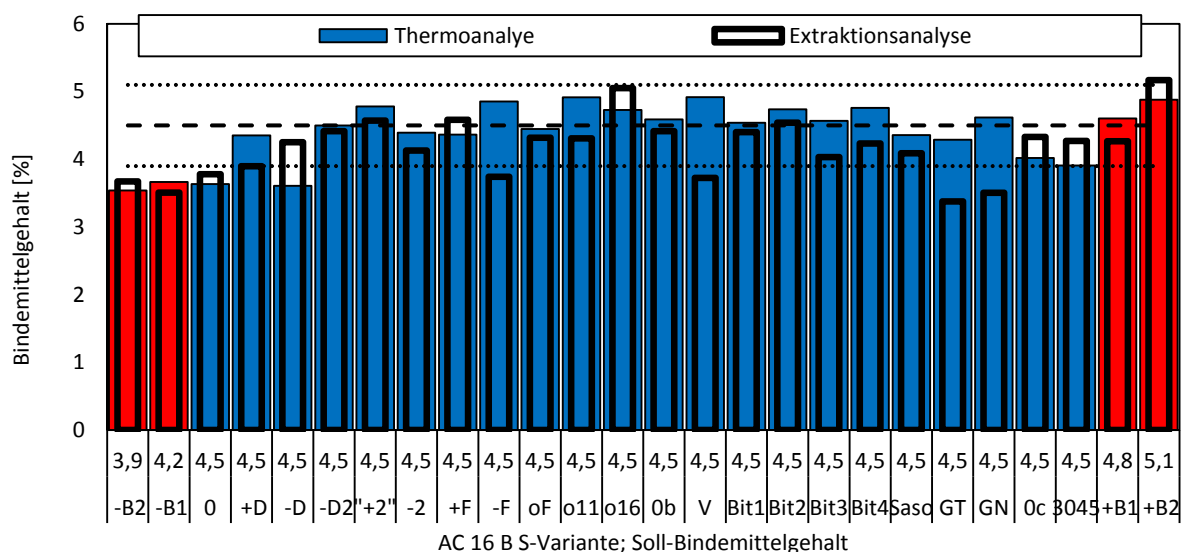


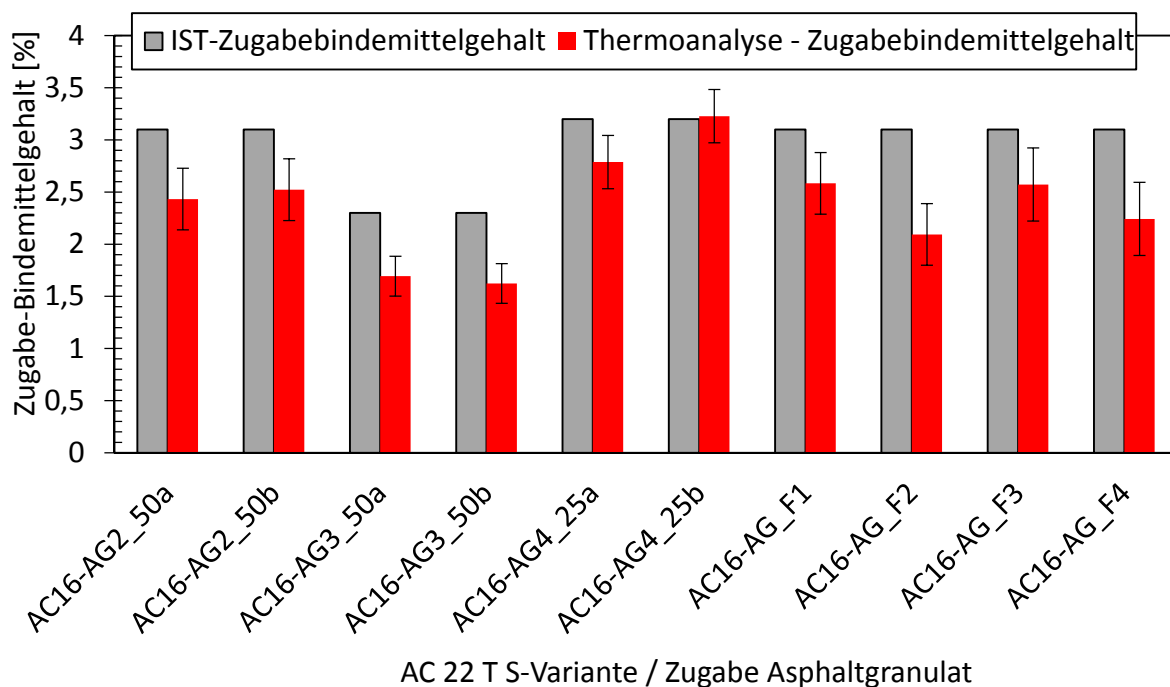
Abbildung 26. Mittels Thermoanalyse und Heißextraktion gemessene Bindemittelgehalte der AC16-BS-Varianten ohne Asphaltgranulat

Für die zehn Asphaltbinder-Varianten mit Zugabe von Asphaltgranulat zeigt Abbildung 27 die mittels Thermoanalyse bestimmten Zugabebindemittelgehalte. Für die Bestimmung der entsprechenden Kalibrierwerte wurden die an den entsprechenden AG-Proben bestimmten Masseverluste in der Thermoanalyse entsprechend Gleichung 4 zusammen mit jenen der anderen Gesteinskörnungen berücksichtigt. Bei den vorliegenden Asphaltbindervarianten wurde die Thermoanalyse an zwei Einzelproben durchgeführt. Aus der daraus resultierenden mittleren Standardabweichung der Masseverluste sowie der anteilig gemäß der AG-Zugabe berücksichtigten Streuung des Masseverlustes der jeweiligen Asphaltgranulatproben (vgl. Tabelle 15)

konnten die dargestellten Fehlerindikatoren bestimmt werden. Wie auch für die Asphalttragschichtvarianten wird der Zugabebindemittelgehalt bei nahezu allen Proben im Mittel um -0,58 % (-1,01 % bis +0,03 %) unterschätzt.

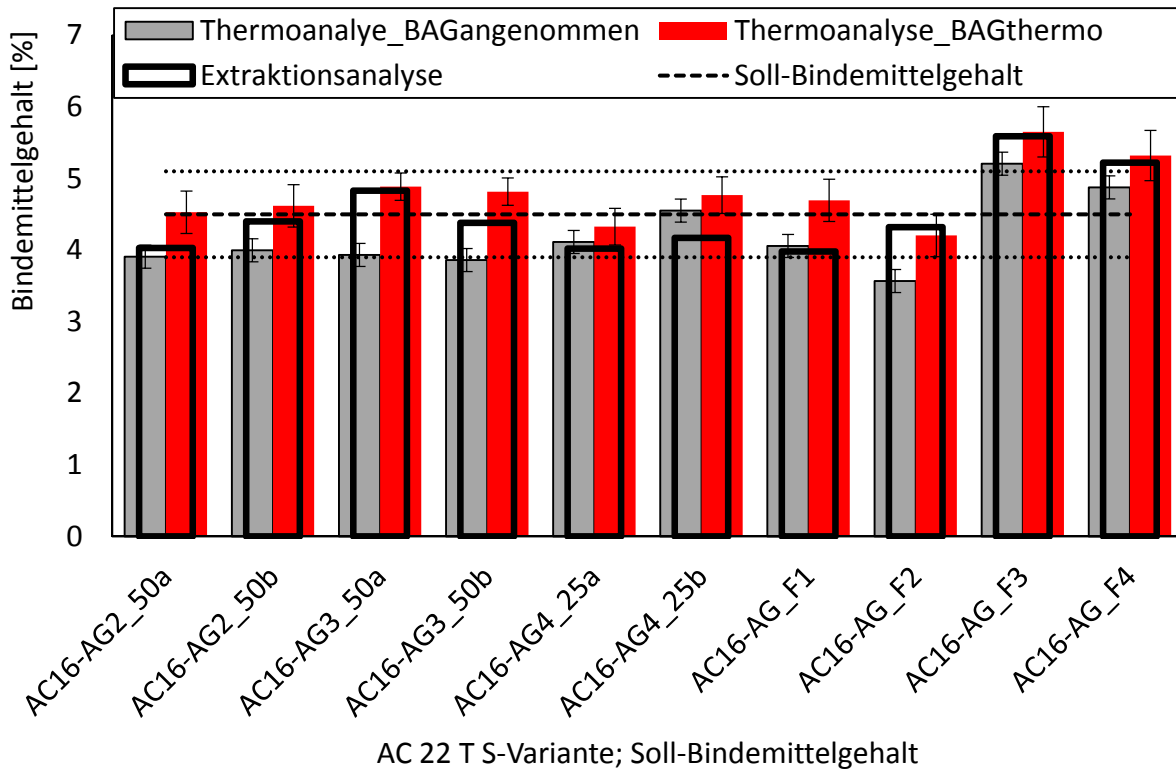
Die mittels Thermoanalyse und Extraktion bestimmten Gesamt-Bindemittelgehalte der Asphaltbindervarianten mit Asphaltgranulat sind in Abbildung 28 dargestellt. Für die Proben wurden Bindemittelgehalte von 4,5 % angestrebt. Aufgrund der Verwendung anderer Asphaltgranulatproben ohne Anpassung der Asphaltrezeptur bei den Proben AC16-AG\_F1 und AC16-AG\_F2 ergibt sich ein theoretische Gesamtbindemittelgehalt von 4,6 %, bei Varianten AC16-AG\_F3 und AC16-AG\_F4 ein Wert von 5,7 %. Wie auch bereits für die Asphalttragschichtvarianten ist ersichtlich, dass die Berücksichtigung des an einer Einzelprobe des jeweiligen Asphaltgranulates mittels Extraktionsanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes – hier bei Verwendung der Asphaltgranulate AG2 und AG3 – zum Unterschätzen des Bindemittelgehaltes führen kann. Wird hingegen der an den Asphaltgranulatproben mittels Thermoanalyse bestimmte Masseverlust berücksichtigt, wird der Bindemittelgehalt bei den Proben überschätzt.

Unabhängig von der Methode der Bestimmung des Kalibrierwertes fallen bei den Proben -F3 und -F4, bei denen anstelle des Asphaltgranulates AG3 das deutlich bindemittelreichere Asphaltgranulat AG4 eingesetzt wurde, durch zu hohe Bindemittelgehalte auf.



**Abbildung 27. Mittels Thermoanalyse bestimmte Zugabeanteile des Frischbindemittels für zehn Asphaltbindervarianten mit AG-Zugabe**





**Abbildung 28. Mittels Thermoanalyse gemessene Bindemittelgehalte der AC16-BS-Varianten mit Asphaltgranulat-Zugabe**

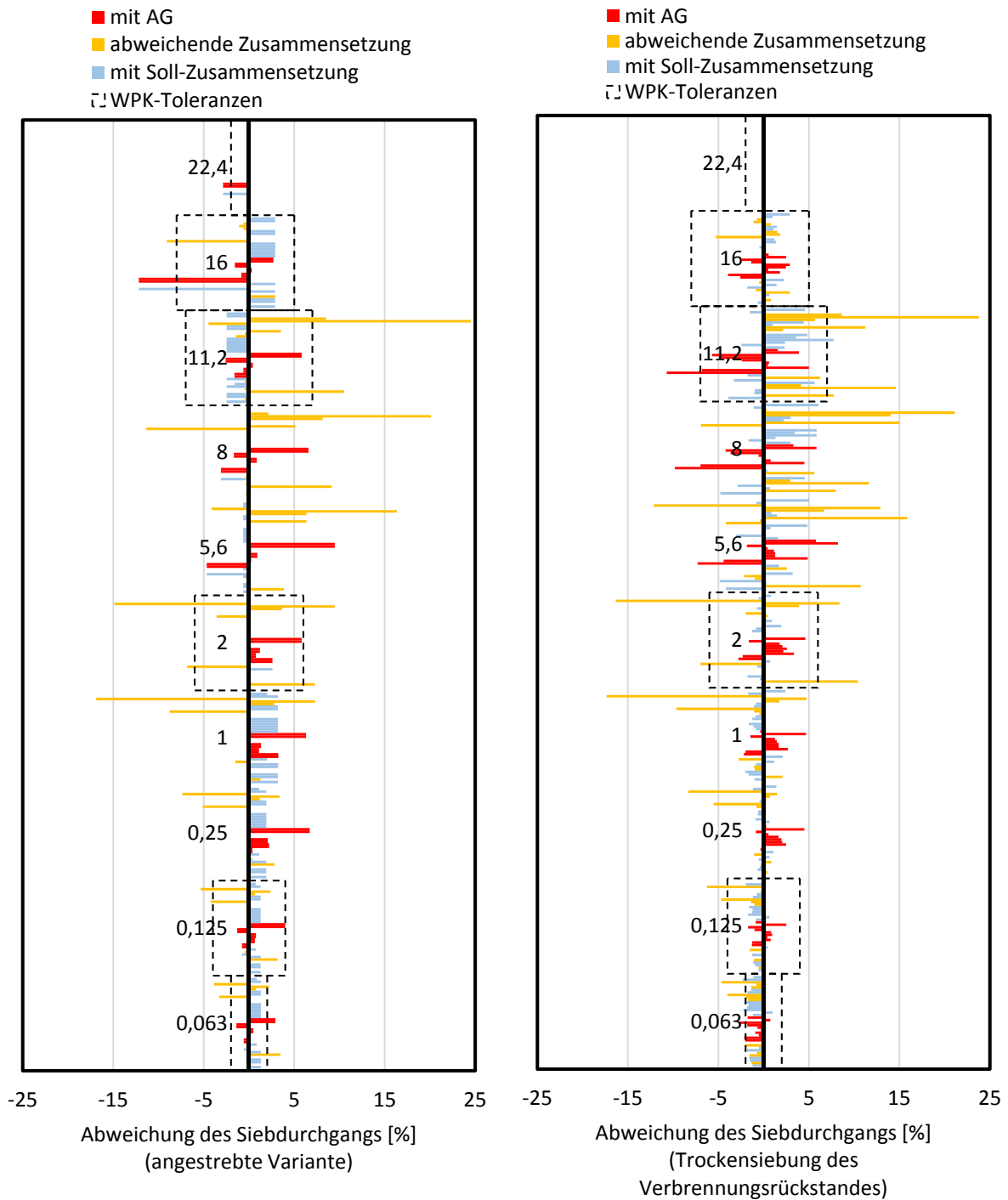
#### 4.2.2.2. Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes

Auch bei den AC 16-Varianten wurde der Verbrennungsrückstand zunächst trocken und die selbe Probe des Gesteinskörnungsgemisches im Anschluss erneut nass gesiebt. Zunächst zeigt Abbildung 29 die Abweichungen der jeweiligen Siebdurchgänge der gemäß Mischgutrezeptur angestrebten Gesteinskörnungsgemische im Vergleich mit den WPK-Toleranzen gemäß DIN EN 13108-21, Tabelle A1.

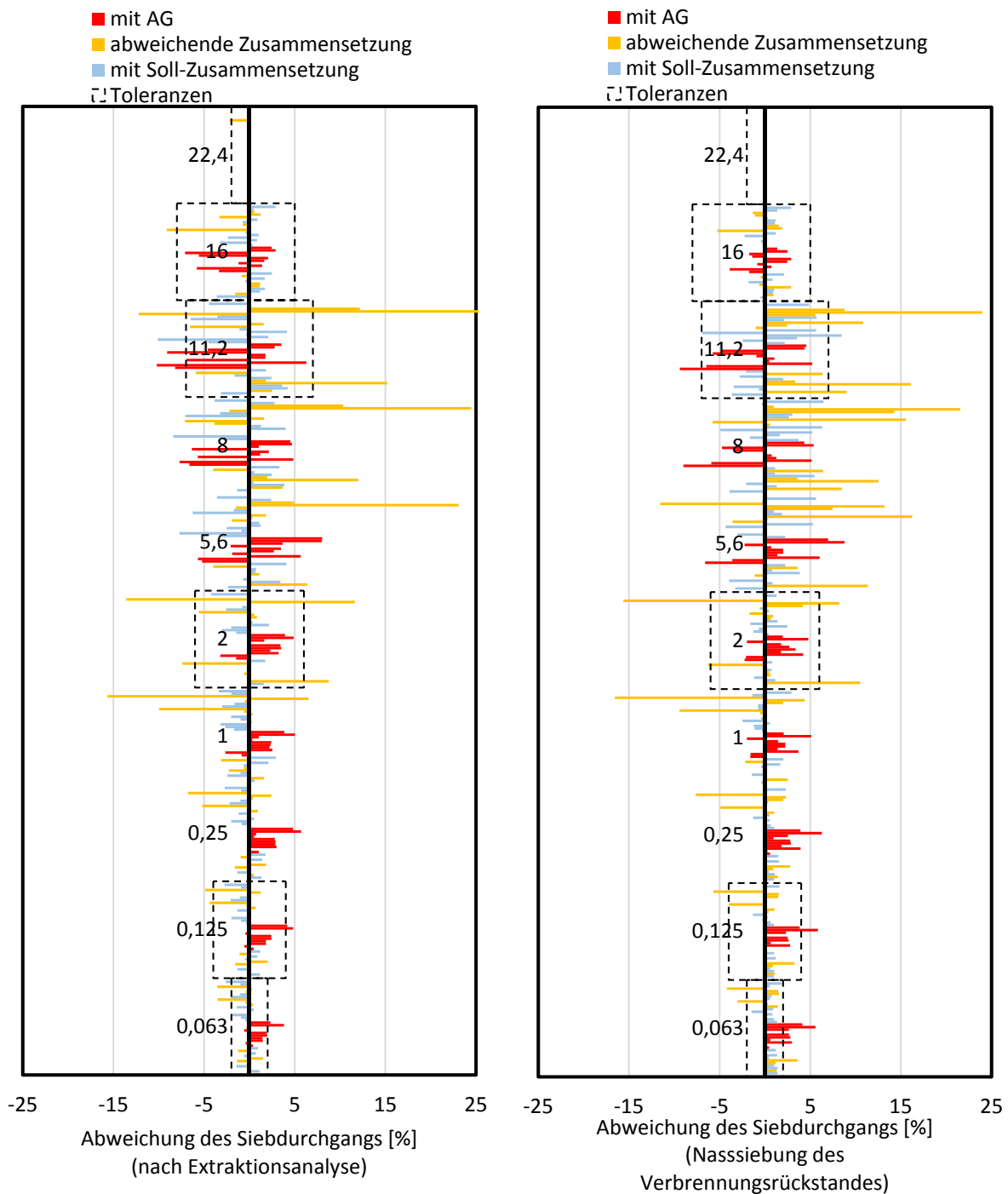
Für die Varianten, welche keine Abweichungen der Korngrößenverteilung aufweisen sollten, weil lediglich Bindemittelgehalt oder Bindemittelart variiert wurden, weisen auch die durch Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes bestimmten Siebdurchgänge im Großteil keine über die Toleranzen hinausgehende Abweichungen mit Ausnahme der Varianten AC16-Bit1 und AC16-Saso (beim Feinanteil), AC16-Bit2 (bei Kornanteil <11,2 mm).

Nach erneuter Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes liegen die resultierenden Feinanteile innerhalb der WPK-Toleranz von  $\pm 2\%$ , siehe Abbildung 30, rechts.

Für die Asphaltbindervarianten, bei denen die Zugabemengen verschiedener Lieferkörnungen variiert wurden, sind in den Ergebnissen der Siebanalysen nach Extraktionsanalyse sowie Thermoanalyse vergleichbare Ausprägungen der Abweichungen zu erkennen.



**Abbildung 29. Abweichungen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches der AC 16-Varianten; links: angestrebte Abweichungen; rechts: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes**



**Abbildung 30. Abweichungen der Siebdurchgänge der AC 16-Varianten von der angestrebten Zusammensetzung; links: Siebung nach Extraktionsanalyse; rechts: Nasssiebung des bereits trocken gesiebten Verbrennungsrückstandes**

In Tabelle 17 sind zunächst die sieben nicht-konformen Asphaltvarianten aufgeführt, für welche die Korngrößenverteilung in der angestrebten Zusammensetzung über die WPK-Toleranzen hinausgehende Abweichungen der Siebdurchgänge gegenüber der Erstprüfungsvariante zeigen. Von diesen sieben nicht-konformen Korngrößenverteilungen wird bei Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes lediglich eine Variante (AC 16-D) nicht identifiziert. Wird nur die Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes berücksichtigt, so wird weiterhin Variante AC16+F fälschlicherweise als konform eingeteilt.

Bei insgesamt 29 Asphaltbindervarianten mit konformer Korngrößenverteilung wird lediglich Variante AC16-AG2\_50a als nicht-konform eingeteilt. Hierbei wird ein zu geringer Siebdurchgang bei 11,2 mm festgestellt, der nicht angestrebt wurde. Dieser zu geringe Siebdurchgang wird allerdings auch durch die Extraktionsanalyse bestätigt.

**Tabelle 17: Als nicht-konform gemäß DIN EN 13108-21 eingestufte Korngrößenverteilungen der AC 16 B S-Varianten (Soll-Zusammensetzung, sowie Trocken- bzw. Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes nach Thermoanalyse)**

IST	Tatsächliche Abweichungen der Korngrößenverteilung	Durch Siebanalyse des Verbrennungsrückstands bestimmte Nicht-konforme KGV	
		Trockensiebung	Nasssiebung
nicht-konform	AC16+D (Siebdurchgang < 11 mm: +10,5 %)	ja (+14,6 %)	ja (+16,1 %)
	AC16-D (Siebdurchgang < 11 mm: -9,1 %)	<b>nein (-5,3 %)</b>	<b>nein (-5,2 %)</b>
	AC16+2 (Siebdurchgang < 2 mm: +7,3 %)	ja (+10,4 %)	ja (+10,5 %)
	AC16+F (Siebdurchgang < 0,063 mm: +3,5%)	<b>nein (-0,7 %)</b>	ja (+3,6 %)
	AC16-F (Siebdurchgang < 0,063 mm: -3,3%)	ja (-4,0 %)	ja (-3,0 %)
	AC16 oF (Siebdurchgang < 0,125 mm: -5,3 %) (Siebdurchgang < 2 mm: -14,9 %)	ja (-6,3 %) ja (-16,3 %)	ja (-5,7 %) ja (-15,6 %)
	AC16 o16 (Siebdurchgang < 2 mm: +9,5 %) (Siebdurchgang < 11,2 mm: +24,5 %)	ja (+8,4%) ja (+23,8 %)	ja (+8,2 %) ja (+24 %)
konform	AC16-AG2_50a (Siebd. < 11,2 mm: -1,1 %)	<b>ja (-10,7 %)<sup>1)</sup></b>	<b>ja (-9,4 %)<sup>1)</sup></b>

<sup>1)</sup> Ergebnis der Extraktionsanalyse: -8,2 %

#### 4.2.2.3. Verdichtungswiderstand

Die an den Asphaltbindervarianten gemäß TP Asphalt-StB, Teil 10B bestimmten Verdichtungswiderstände T sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Spannweite der an jeder AC16-Variante bestimmten drei Einzelwerte sind als Fehlerindikatoren eingezeichnet. Weiterhin zeigt die gestrichelte Linie jeweils die Wiederholpräzision, welche sich auf die jeweiligen Vergleichsvarianten bezieht. Als Soll-Wert dienen dazu die Mittelwerte aus den Varianten AC16-0 und AC16-0b für die Variationen der Zusammensetzung (Variation des Bindemittelgehaltes ist in hellblau, die des Gesteinskörnungsgemisches in orange dargestellt) sowie Varianten AC16-0c und -V, welche mit abweichender Zusammensetzung der Lieferkörnungen hergestellt wurden, jedoch in der gleichen Korngrößenverteilung resultierten (dunkelgrün).

Die Variation des Bindemittelgehaltes resultiert tendenziell in einem Anstieg des Verdichtungswiderstandes mit geringerem Bindemittelgehalt. Hier weicht nur der Verdichtungswiderstand von Variante AC16-B1 um mehr als die Wiederholpräzision vom Vergleichswert ab.

Hinsichtlich der Variation der Korngrößenverteilung des Asphaltmischgutes ergeben sich über die Wiederholpräzision herausgehende Anstiege des Verdichtungswiderstandes für die Varianten AC16-D2, AC16-2 und AC16-oF.

Die beiden Grundvarianten mit variiertem Gesteinszusammensetzung (in dunkelgrün dargestellt) waren Ausgangsmaterialien für die Variation des zugegebenen Bindemittels (dunkelblau) sowie der Asphaltgranulatzugabe (rot). Der Einsatz von abweichenden Bindemittelsorten (20/30, 30/45, 50/70, 70/100 in AC16-Bit2, -Bit1, -Bit3 und -Bit4) führt nicht zu über die Wiederholpräzision hinausgehenden Abweichungen des Verdichtungswiderstandes. Ebenso ist

auch die Zugabe von viskositätsverändernden Zusätzen (hier 3 % Sasobit) unauffällig. Lediglich bei Zugabe von 5 % Gummigranulat ergeben sich über die Wiederholpräzision hinausgehende Abnahmen des Verdichtungswiderstandes (Varianten AC16-GT und -GN).

Bei Zugabe von Asphaltgranulat und einer entsprechend der AG-Zusammensetzung vorgenommenen Anpassung der Asphaltrezeptur werden vergleichbare Verdichtungswiderstände gemessen. Lediglich bei Variante AC16-AG2-50b überschreitet der Verdichtungswiderstand die Grenze der Wiederholpräzision. Wird jedoch ein anderes Asphaltgranulat eingesetzt, ohne dass die Rezeptur entsprechend angepasst wird (Varianten AC16-AG\_F1 bis \_F4), so treten Abweichungen des Verdichtungswiderstandes auf, die größer sind als die Wiederholpräzision.

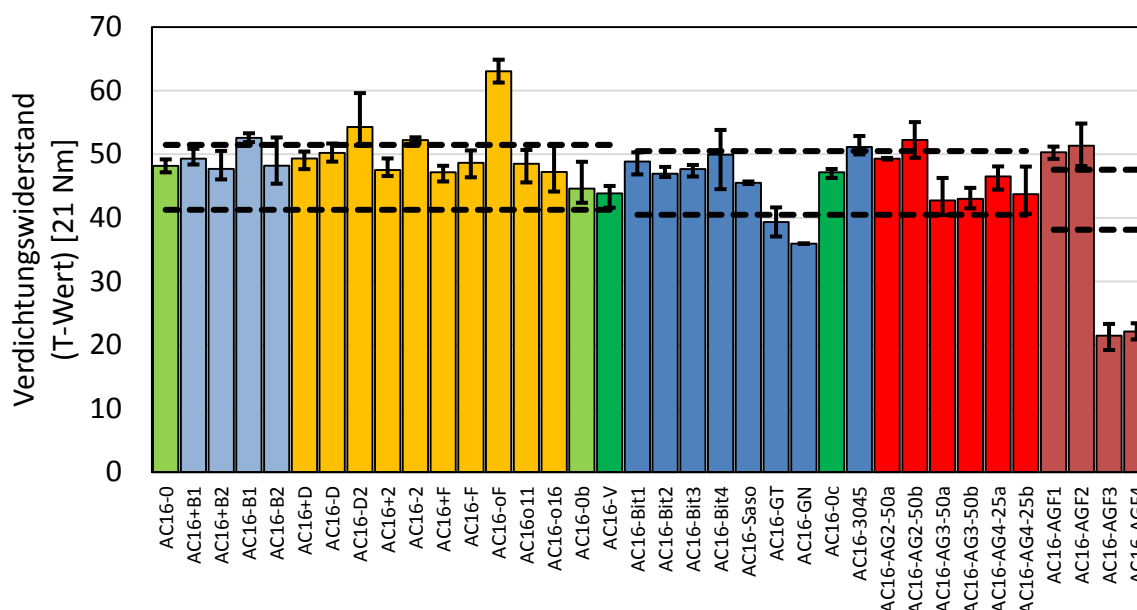


Abbildung 31. An den Asphaltbinder-Varianten bestimmte Verdichtungswiderstände (T-Wert)

#### 4.2.2.4. Hohlraumgehalt

In Abbildung 32 sind die an den Marshallprobekörpern für die Bestimmung von Stabilität und Fließwert bestimmten Hohlraumgehalte dargestellt. Der Großteil der untersuchten Varianten wurde ausgehend von der Zusammensetzung der Proben AC16-0 und -0b variiert, für die die Grenzen der Wiederholpräzision als gestrichelte Linie dargestellt sind. Die Varianten mit Asphaltgranulatzugabe wurden ausgehend von den Bindern AC16-V und -0c zusammengesetzt, wodurch sich andere Grenzen der Wiederholbarkeit ergeben.

Wie bereits bei den AC22TS-Varianten führen Variationen der Zusammensetzung (Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung – hier hellblau und orange dargestellt) zu großen Abweichungen des Hohlraumgehaltes. So liegen die vorgenommenen Variationen alle an der Grenze bzw. außerhalb der Wiederholpräzision.

Die Variationen des eingesetzten Bindemittels liegen allesamt innerhalb der Wiederholpräzision.

Die Zugabe verschiedener Asphaltgranulate führt tendenziell zu einer Verringerung des Hohlraumgehaltes, auch wenn die Zusammensetzung des Asphaltgranulates bei der Rezeptur des

Mischgutes individuell berücksichtigt wird. Dabei liegen die Hohlraumgehalte für vier Asphaltbindervarianten mit Zugabe von AG2 und AG4 innerhalb der Wiederholpräzision. Bei Zugabe von Asphaltgranulat AG3 unterschreiten die Hohlraumgehalte die entsprechende Wiederholpräzision.

Die Varianten AC16-AG3-50a und b sind Ausgangspunkt für die verbleibenden vier Asphaltbinder-Varianten, bei denen die Asphaltgranulate AG2 und AG4 zugegeben wurden, ohne die Asphaltrezeptur entsprechend anzupassen. Hier weisen die Hohlraumgehalte der Varianten AC16-F1 bis –F4 gut die Abweichung aus, da sie außerhalb der Wiederholpräzision – bezogen auf die Vergleichsvarianten mit AG3 liegen.

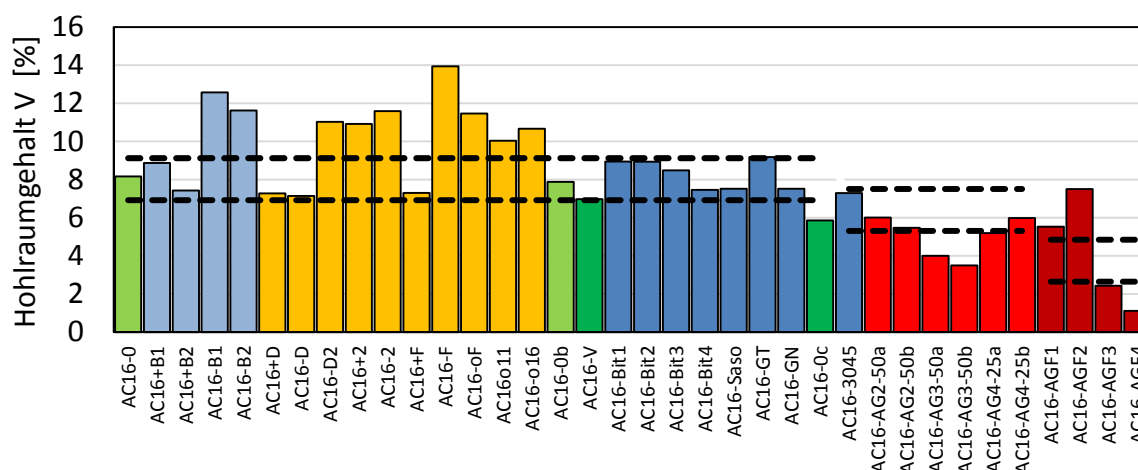


Abbildung 32. Hohlraumgehalte der aus den AC16-Varianten hergestellten Marshall-Probekörper

#### 4.2.2.5. Marshall-Stabilität und Fließwert

Die für die Asphaltbinder-Varianten ermittelten Werte der Marshall-Stabilität sind in Abbildung 33 dargestellt. Neben den Spannweiten der drei ermittelten Einzelwerte ist die Wiederholpräzision für die verschiedenen Vergleichsvarianten dargestellt.

Zunächst fällt auf, dass die beiden Soll-Varianten AC16-0 und -0b sehr stark voneinander abweichen, sodass beide Einzelwerte außerhalb der auf den Mittelwert beider Varianten bezogenen Wiederholpräzision liegen. Auch die Vergleichsvarianten für die Variation der Bindemiteleigenschaften AC16-V und -0c liegen gerade innerhalb der Wiederholpräzision, welche sich aus ihrem Mittelwert ergibt. Trotz dieser Abweichungen der Vergleichsvarianten wird die Wiederholbarkeit als Kriterium für Auffälligkeiten der einzelnen Asphaltbindervarianten verwendet.

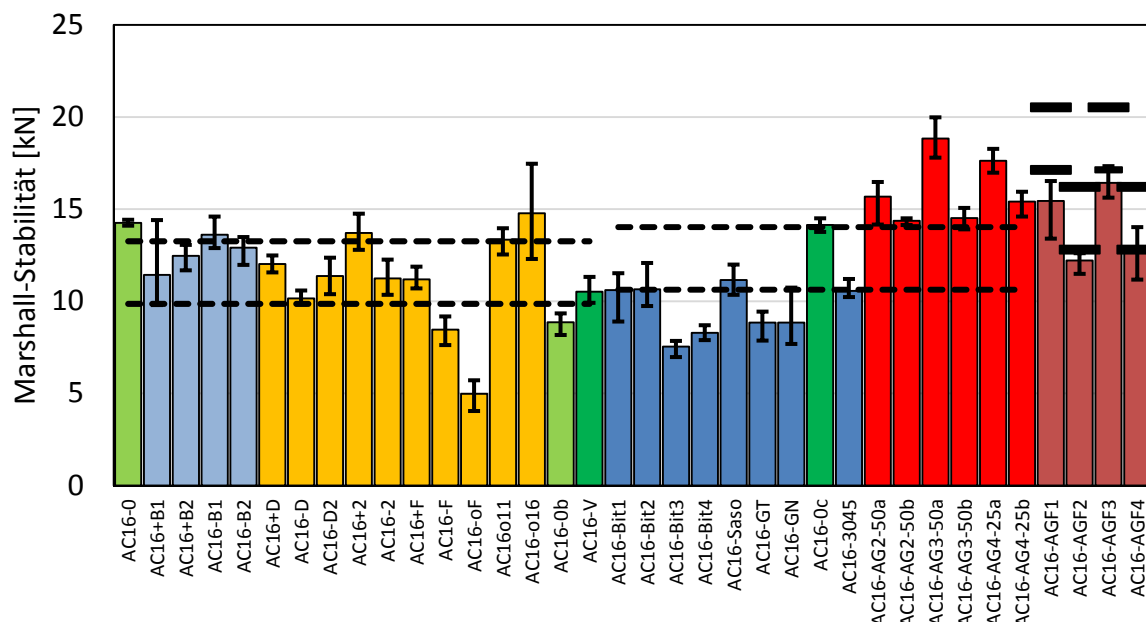
Hinsichtlich der Variation der Zusammensetzung der Asphaltbinder fällt auf, dass die Variationen des Bindemittelgehaltes vergleichsweise geringe Veränderungen der Marshall-Stabilität bewirken. Lediglich Variante AC16-B1 weist eine über die Wiederholbarkeit hinausgehende Stabilität auf.

Die Marshall-Stabilität reagiert deutlich sensibler auf die vorgenommenen Variationen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches. Hier treten deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten auf. Dabei weisen die Varianten AC16+2 und AC16o16 die Wiederholbarkeitsgrenze überschreitende, die Varianten AC16-F und AC16-oF diese unterschreitende Abweichungen auf.

Hinsichtlich der Variation des eingesetzten Bindemittels zeigt sich tendenziell eine Abnahme der Stabilität mit abnehmender Bindemittelviskosität. Die Zugabe von viskositätsveränderndem Zusatz (Variante AC16-Saso im Vergleich zu AC16-Bit 3) bewirkt eine signifikante Zunahme der Marshall-Stabilität. Auffällige Asphaltbindervarianten mit Abweichungen gegenüber der mittleren Stabilität der Vergleichsvarianten sind die Varianten mit weicherem Straßenbaubitumen AC16-Bit3, -Bit4 sowie die gummimodifizierten Varianten AC16-GT und -GN.

Bei den Varianten mit Asphaltgranulatzugabe wurden höhere Stabilitäten gemessen, die über die Wiederholbarkeit der Vergleichsvariante hinausgehen. Dabei zeigen sich systematische Unterschiede hinsichtlich des zugegeben Frischbindemittels 25/55-55A (AG-Varianten a), welches bei allen Varianten mit AG-Zugabe zu höherer Stabilität führt als das Frischbindemittel 50/70 (AG-Varianten b).

Die Varianten, bei denen abweichendes Asphaltgranulat eingesetzt wurde, ohne dass die Asphaltrezeptur angepasst wurde, zeigen die Wiederholbarkeitsgrenze unterschreitende Werte der Marshall-Stabilität (Varianten AC16-F1 und F2 im Vergleich zu AC16-AG3-50a sowie AC16-F2 und -F4 im Vergleich zu AC16-AG3-50b).



**Abbildung 33. An Asphaltbinder-Varianten bestimmte Werte der Marshall-Stabilität**

In Abbildung 34 sind die in den Marshallversuchen gemessenen Fließwerte dargestellt. Die dargestellten Spannweiten der Einzelversuche weisen eine relativ zu den Unterschieden zwischen den Asphaltbindervarianten größere Prüfstreuung auf, als sie bei den Marshall-Stabilität auftritt.

Die Variation der Zusammensetzung der Asphaltbinder führt zu deutlichen Unterschieden im Fließwert. Die Variation des Bindemittelgehaltes führt zu unsystematisch variierenden Fließwerten, die bei Variante AC16-B1 über die Wiederholpräzision nach TP Asphalt-Stb, Teil 34 hinaus geht. Ebenfalls führt die Veränderung des Gesteinskörnungsgemisches zu Abweichungen. Hier unterschreiten die Fließwerte der Varianten AC16+D, -D, -F, -oF, und -o16 die Wiederholpräzision.

Die Variation des eingesetzten Bindemittels führt nur bei Varianten AC16-Bit1 (30/45 anstelle von 25/55-55A) sowie AC16-Saso (30/45 mit 3 % viskositätsveränderndem Zusatz) zu über die Wiederholbarkeit hinausgehenden Abweichungen.

Die Abweichungen der Varianten mit Asphaltgranulatzugabe, bei denen eine Anpassung der Asphaltzusammensetzung hinsichtlich der Asphaltgranulateigenschaften vorgenommen wurde, liegen innerhalb der Wiederholpräzision. Von den vier Varianten, bei denen abweichende Asphaltgranulate eingesetzt wurden, werden die Varianten AC16-AG-F3 und -F4 als auffällig identifiziert.

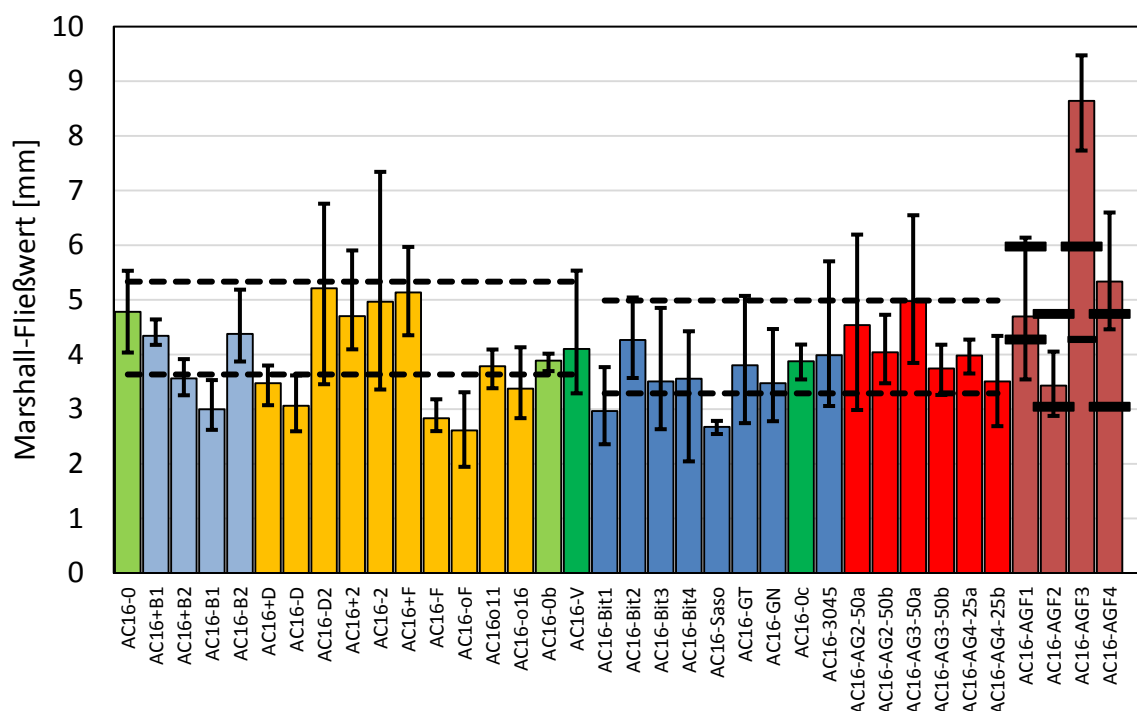


Abbildung 34. An Asphaltbinder-Varianten bestimmte Marshall-Fließwerte

#### 4.2.2.6. Ergebnisse der Spaltzugversuche

In Abbildung 35 sind die an den Asphaltbinderproben bestimmten Spaltzugfestigkeiten zusammengestellt. Da für die Spaltzugfestigkeit in den TP Asphalt-StB, Teil 23 keine Prüfpräzision angegeben ist, wurde die Wiederholbarkeit anhand der mittleren Standardabweichung der Ergebniswerte berechnet. Aus dem 2,77-fachen der mittleren Standardabweichung ergibt sich eine Wiederholpräzision von 0,37 MPa (vgl. TP Asphalt-StB, Teil 0).

Hinsichtlich der Variation der Asphaltzusammensetzung kann ein systematischer Einfluss des Bindemittelgehaltes erkannt werden. So nimmt die Spaltzugfestigkeit mit ansteigendem Bindemittelgehalt zu. Diese Tendenzen liegen jedoch außer bei Variante AC16-B2 innerhalb der aus der mittleren Standardabweichung aller Asphaltbinder-Varianten geschätzten Wiederholpräzision.

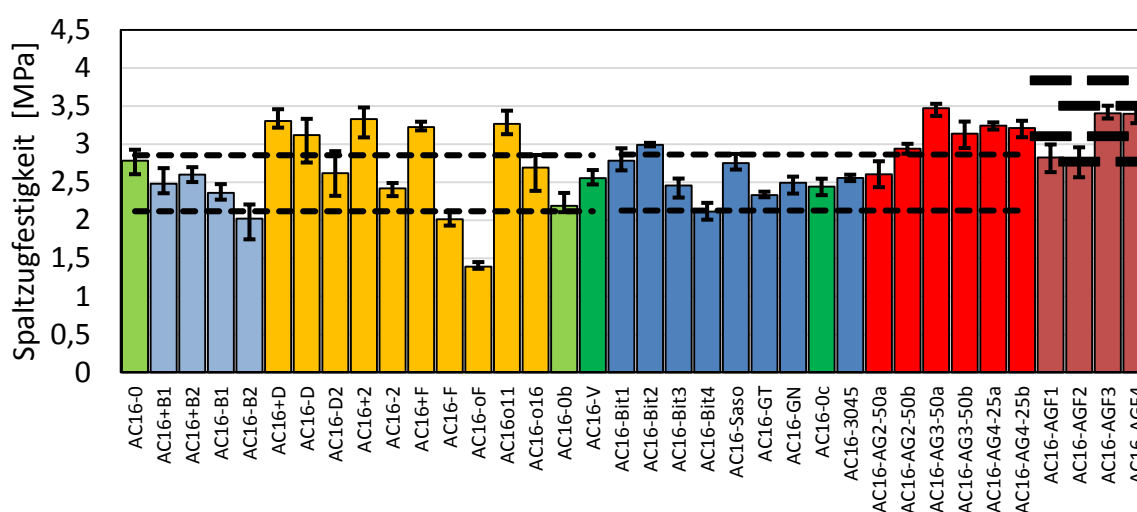
Die Spaltzugfestigkeit reagiert vergleichsweise sensibel auf die Variation der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches. So resultieren die vorgenommenen Veränderungen der Zusammensetzung in der Mehrzahl über die Wiederholpräzision hinausgehende Variationen der Spaltzugfestigkeiten. Hinsichtlich der Variation des Füllergehaltes und des Anteils feiner Gesteinskörnungen sind diese Auswirkungen auch systematisch. Hierbei resultiert aus



eine verringerten Feinanteil bzw. einer Verringerung des Anteils feiner Gesteinskörnungen eine Abnahme der Spaltzugfestigkeit.

Ebenfalls zeigt sich ein systematischer Einfluss der Viskosität des zugegebenen Bindemittels auf die Spaltzugfestigkeit. Hier weisen die Varianten AC16-Bit2, -Bit1, -Bit3, -Bit4 eine kontinuierliche Abnahme der Spaltzugfestigkeit mit jeweils weicherer Bindemittelsorte auf. Diese Unterschiede liegen jedoch innerhalb der Wiederholpräzision. Weitere Änderungen der Binde-mittleigenschaften werden nicht identifiziert.

Hinsichtlich der Asphaltgranulatzugabe weisen die Varianten mit Verwendung der Granulate AG3 und AG4 die Wiederholpräzision überschreitende Spaltzugfestigkeiten auf. Bei den mit falschen Asphaltgranulatproben hergestellten Varianten können die Asphaltbinder AC16-AG-F1 und -F2 anhand der Spaltzugfestigkeit als auffällig identifiziert werden.



**Abbildung 35. An Asphaltbindern bestimmte Spaltzugfestigkeit**

Die in den Spaltzugversuchen bis zum Kraftmaximum aufgetretenen Horizontalverformungen sind in Abbildung 36 vergleichend gegenübergestellt. Anhand der relativ großen Prüfstreuung, welche sich in einer mittleren Standardabweichung von 0,03 mm niederschlägt, ergibt sich eine geschätzte Wiederholpräzision von 0,08 mm.

Die Variation der Asphaltzusammensetzung hat einen relativ geringen Einfluss auf die gemessene Horizontalverformung. Lediglich Variante AC16-2 unterschreitet die ermittelte Grenze der Wiederholpräzision. Wie bei der Spaltzugfestigkeit weist auch die Horizontalverformung eine systematische Abhängigkeit von der eingesetzten Bindemittelsorte auf. Hierbei weisen jedoch die Varianten AC16-Bit2 und AC16-GN über die Wiederholpräzision hinausgehende Abweichungen auf. Hinsichtlich der Zugabe von Asphaltgranulat können keine über die Wiederholpräzision hinausgehende Abweichungen der horizontalen Verformung identifiziert werden.

Die bis zur Maximalkraft aufgenommenen Verformungsarbeiten sind in Abbildung 37 zusammengestellt. Hierbei ergeben sich vergleichbare Relativunterschiede zwischen den verschiedenen Asphaltbinder-Varianten wie für die Spaltzugfestigkeit.

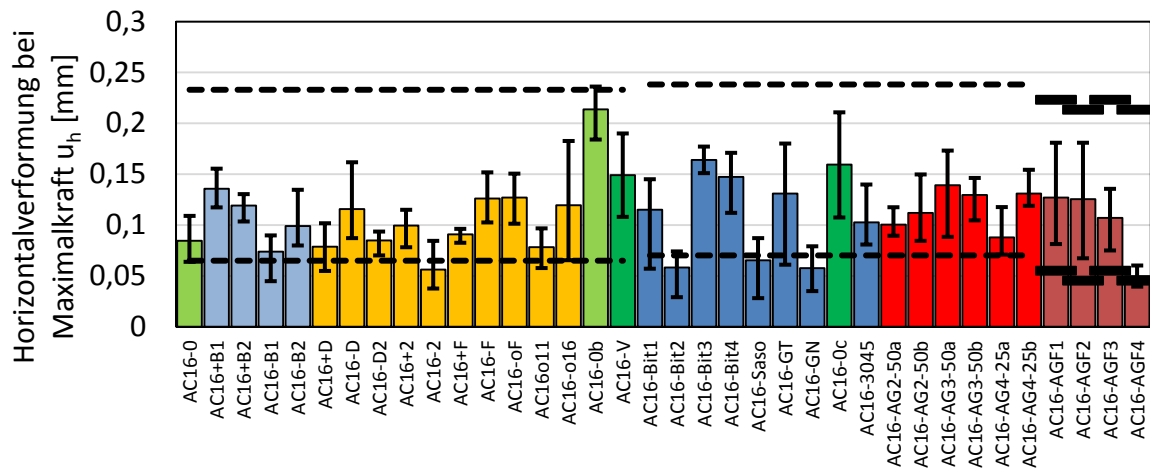


Abbildung 36. In Spaltzugversuchen an Asphaltbindern bestimmte Horizontalverformung bei Maximalkraft

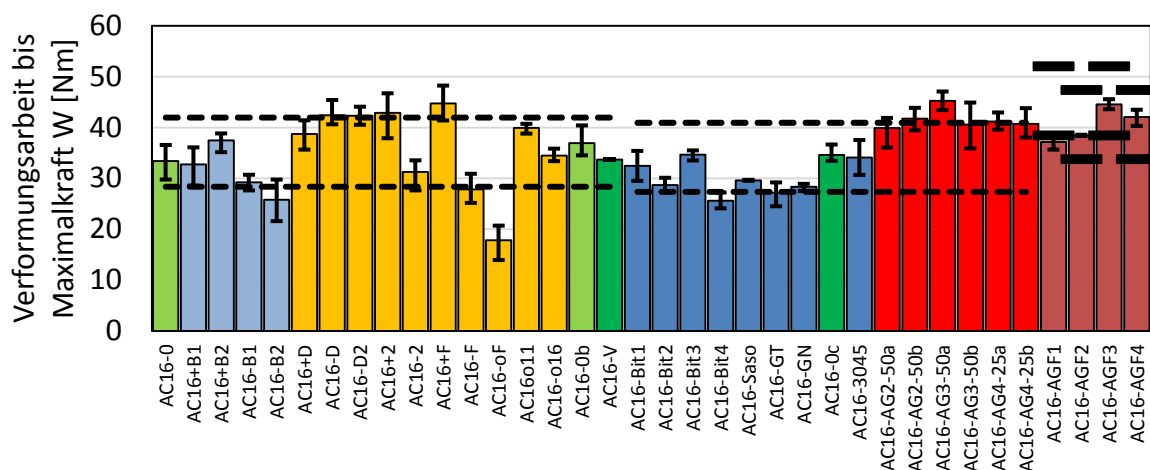


Abbildung 37. In Spaltzugversuchen an Asphaltbindern bestimmte Verformungsarbeit bis Maximalkraft

#### 4.2.3. AC 11 D S

Im Folgenden werden die an den Asphaltbetonvarianten für Asphaltdeckschichten AC 11 D S bestimmten Ergebnisse diskutiert.

Abbildung 38 zeigt die an den sechs Asphaltvarianten bestimmten Bindemittelgehalte. Die bei den Varianten AC11-B und AC11+B variierten Bindemittelgehalte können mittels Thermoanalyse identifiziert werden. Für die drei Varianten mit veränderten Gesteinskörnungsgemisch wird der Bindemittelgehalt mittels Thermoanalyse überschätzt. Im Vergleich dazu zeigten die mittels Heißextraktion bestimmten Bindemittelgehalte Schwankungen in vergleichbarer Größenordnung.

In Abbildung 39 sind die Abweichungen der Korngrößenverteilung der verschiedenen Asphaltvarianten von der angestrebten Zusammensetzung gemäß Erstprüfung sowie nach Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes gezeigt. Abbildung 40 zeigt die entsprechenden Abweichungen, die mittels Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes sowie mittels Extraktionsanalyse bestimmt wurden.

Bei allen drei Varianten mit konform angestrebtem Gesteinskörnungsgemisch liegen die bestimmten Abweichungen der Siebdurchgänge innerhalb der Toleranz der WPK gemäß DIN EN 13108-21. Bei allen drei Varianten mit angestrebt variiertem Gesteinskörnungsgemisch werden einzelne WPK-Toleranzen überschritten. Ebenso können mit allen drei angewendeten Siebverfahren die über die WPK-Toleranz hinausgehenden Abweichungen der Variante AC11-F und AC11-G identifiziert werden. Für die Variante ohne Natursand (AC 11-kS) wird der über die WPK-Grenze hinaus gehende erhöhte Feinanteil nur mittels Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes nach Thermoanalyse identifiziert.

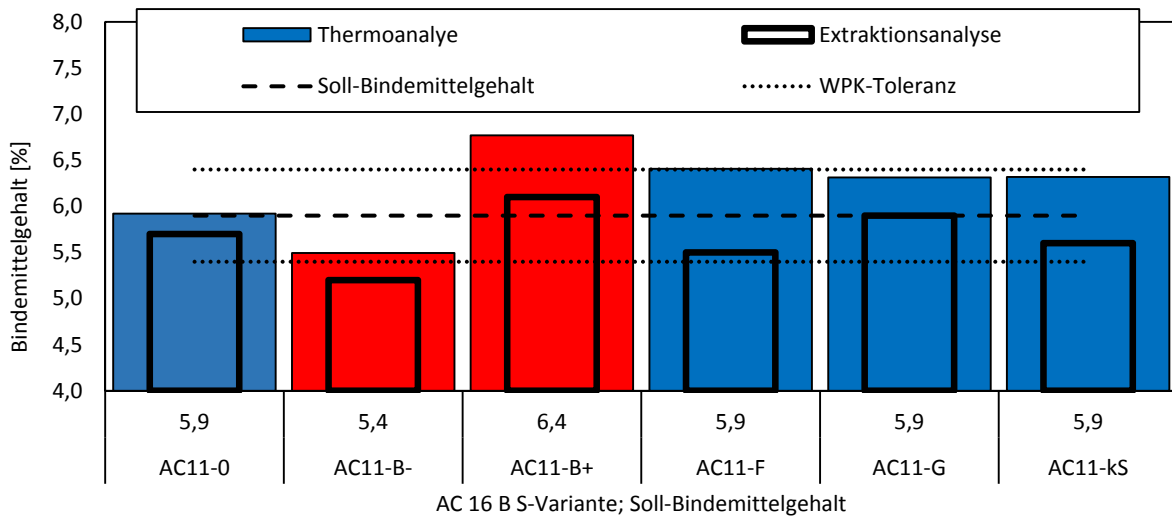


Abbildung 38. Mittels Thermoanalyse und Heißextraktion gemessene Bindemittelgehalte der AC11-DS-Varianten

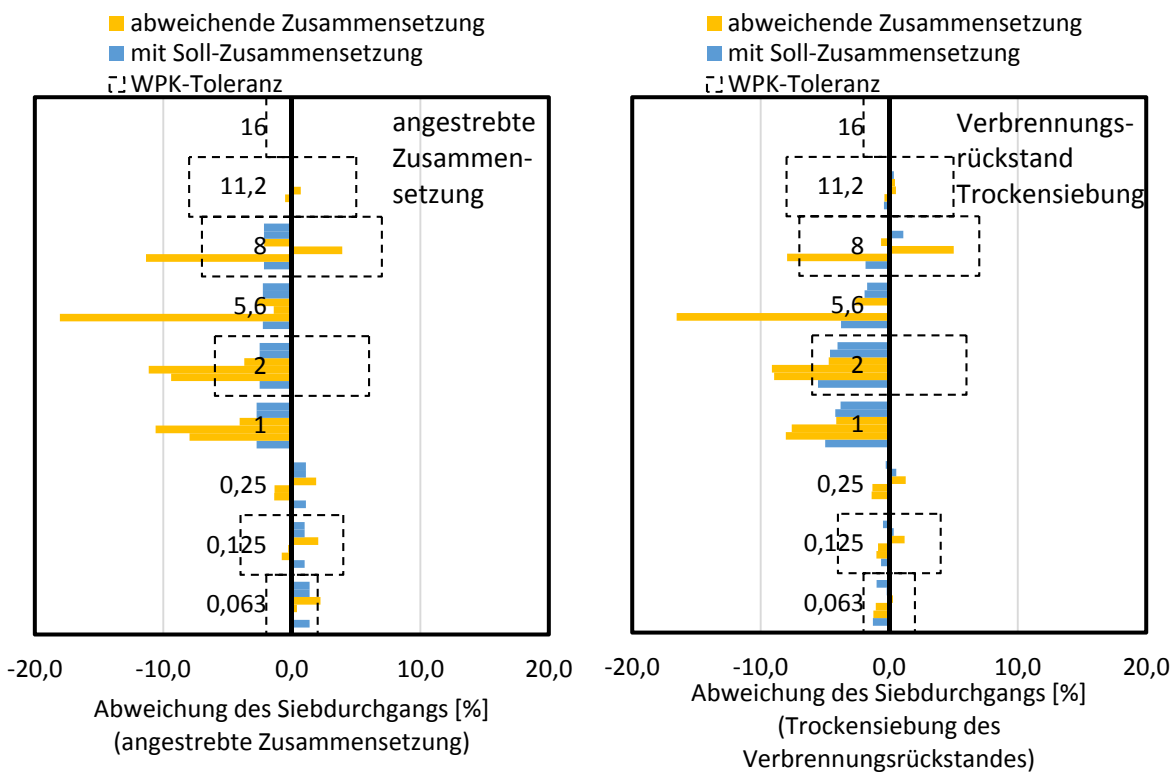
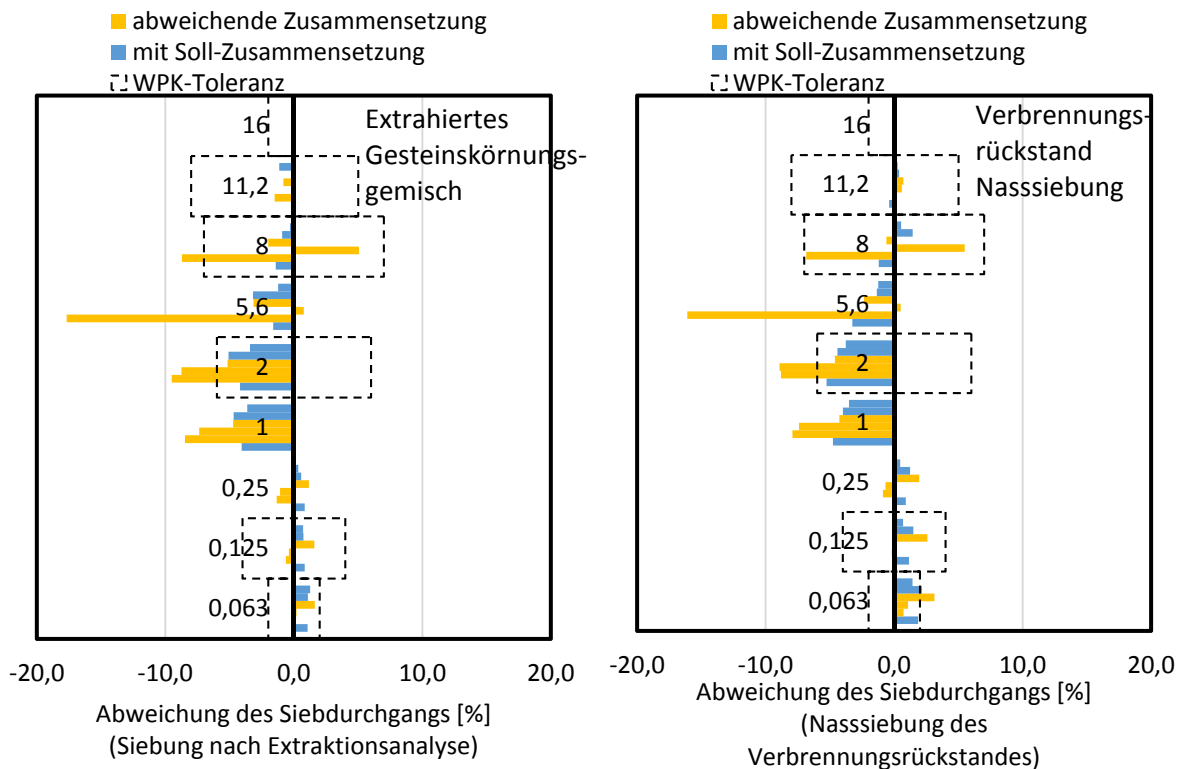


Abbildung 39. Abweichungen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches der AC 11-Varianten; links: angestrebte Abweichungen; rechts: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes



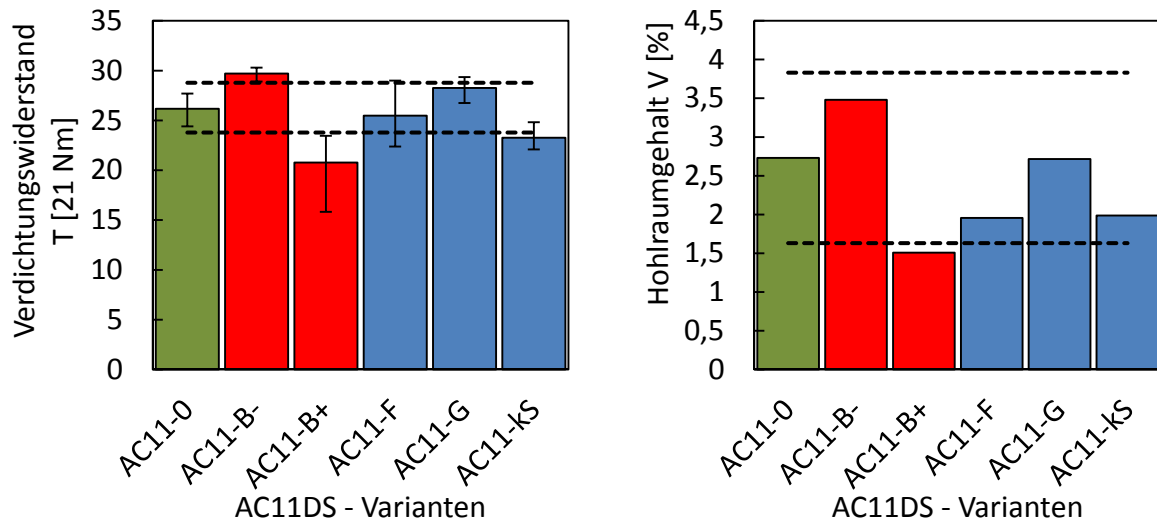
**Abbildung 40. Abweichungen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches der AC 11-Varianten; links: Abweichungen der Siebdurchgänge des extrahierten Gesteinskörnungsgemisches; rechts: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes**

#### 4.2.3.1. Ergebnisse der mechanischen Prüfungen

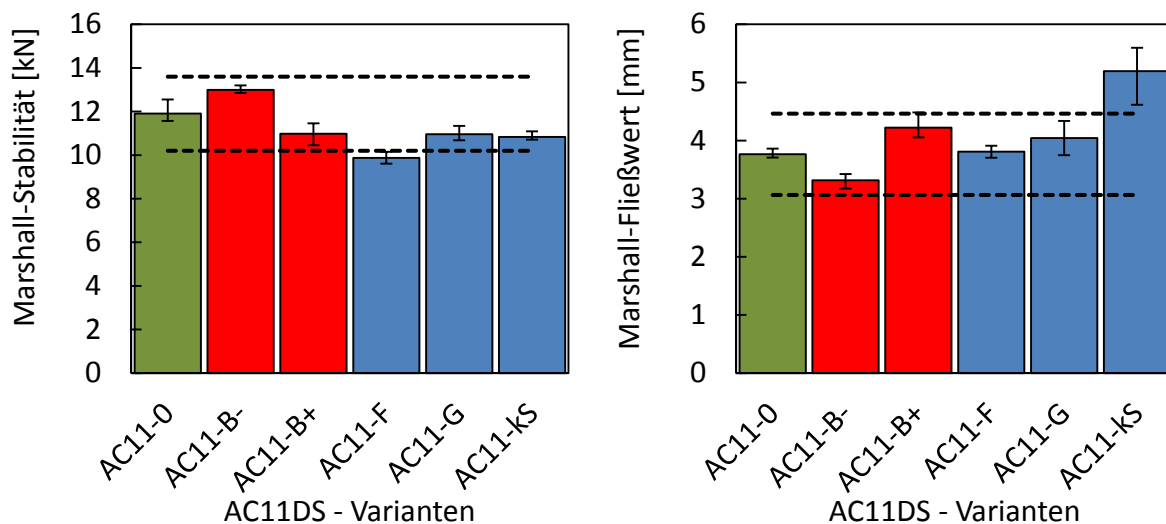
Die gemäß TP Asphalt-StB, teil 10 bestimmten Verdichtungswiderstände sowie die an den normverdichteten Marshall-Probekörpern bestimmten Hohlraumgehalte sind in Abbildung 41 dargestellt. Die horizontalen Linien zeigen jeweils die Wiederholpräzision gemäß den technischen Prüfvorschriften. Systematisch verändern sich sowohl der Verdichtungswiderstand als auch der Hohlraumgehalt mit Veränderung des Bindemittelgehaltes. Dabei sind die Auswirkungen auf den Verdichtungswiderstand größer als die Wiederholpräzision.

Die durchgeführten Variationen des Gesteinskörnungsgemisches bewirken ebenfalls Änderungen, welche jedoch innerhalb der Wiederholpräzision liegen.

In Abbildung 42 sind die Ergebnisse der Marshall-Versuche an den AC11DS-Varianten dargestellt. Sowohl Stabilität als auch der Fließwert zeigen einen systematischen Einfluss des Bindemittelgehaltes. Auch die Variation der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches beeinflusst die Ergebnisse, wobei nur die Varianten AC11-F mit verringertem Feinanteil eine über die Wiederholpräzision hinausgehende Verringerung der Stabilität und Variante AC11-kS (ohne Natursand) einen über die Wiederholpräzision hinausgehenden Anstieg des Fließwertes aufweisen.



**Abbildung 41. Verdichtungswiderstand (links) und Hohlraumgehalt der Marshall-Probekörper (rechts) der AC11DS-Varianten**



**Abbildung 42. Ergebnisse der Marshall-Versuche an den AC11DS-Varianten**

Die Ergebnisse der Spaltzugversuche sind in Abbildung 43 dargestellt. Dabei sind für alle Asphaltbetone mit Variation der Zusammensetzung Zunahmen der Spaltzugfestigkeit und der Verformungsarbeit sowie Abnahmen der Horizontalverformung im Vergleich zur Ausgangsvariante AC11-0 zu verzeichnen. Über die aus den mittleren Standardabweichungen hinausgehende Veränderungen der Ergebnisse betreffen für die Spaltzugfestigkeit Varianten AC11-B-, AC11-G und AC11-ks, für die Horizontaldehnung AC11-B- und für die Verformungsarbeit AC11-B+, AV11-F, AC11-G und AC11-ks.

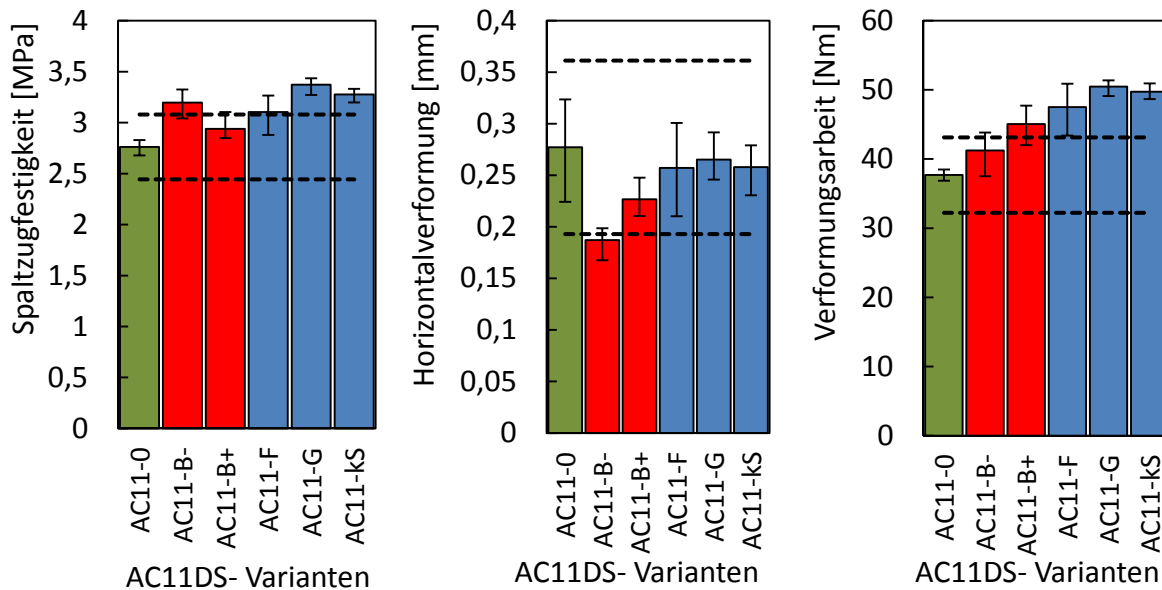


Abbildung 43. Ergebnisse der Spaltzugversuche an den AC11DS-Varianten

#### 4.2.4. SMA 8 S

Insgesamt wurden 36 Splittmastixasphalt-Variationen im Labor hergestellt und untersucht.

##### 4.2.4.1. Bindemittelgehalt

Die mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehalte sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 dargestellt. Im Laufe des Projektes wurde die Rezeptur des Splittmastixasphaltes wegen Verwendung gewaschener Gesteinskörnungen variiert, wobei auch der Bindemittelgehalt angepasst wurde.

Der zu geringe Bindemittelgehalt der Variante SMA8-B kann mittels Thermoanalyse identifiziert werden. Allerdings kann mittels Thermoanalyse an der Variante mit erhöhtem Bindemittelgehalt SMA8+B nicht der höher angestrebte Bindemittelgehalt erkannt werden.

Insgesamt liegt der mittels Thermoanalyse bestimmte Bindemittelgehalt im Mittel um 0,16 M.-% unter dem angestrebten Bindemittelgehalt, wobei Abweichungen zwischen -1,07 M.-% und +0,77 M.-% auftreten. Vergleichbar hohe Abweichungen werden auch bei dem mittels Extraktionsanalyse unter Verwendung von Toluol erfasst, sodass diese Abweichungen zum Teil auf eine Entmischung des Asphaltes bei der Probenentnahme zurückzuführen sein können. Auffällig ist, dass für die in Abbildung 44 dargestellten SMA-Varianten, die mit einem Soll-Bindemittelgehalt von 7,3 % hergestellt wurden, in der Thermoanalyse eher zu geringe Bindemittelgehalte bestimmt wurden. Demgegenüber weist die Mehrzahl der SMA-Varianten, welche mit leicht veränderter Rezeptur aus gewaschenen Gesteinskörnung mit einem Bindemittelgehalt von 7,4 % hergestellt wurden, in der Thermoanalyse zu hohe Bindemittelgehalte auf. Ursächlich für diese unterschiedlichen Ergebnisse kann sein, dass die Gesteinskörnungen veränderte thermische Eigenschaften aufweisen, da die zweite SMA-Gruppe mit 7,4 % Bindemittelgehalt etwa ein Jahr nach der ersten Probengruppe hergestellt und untersucht wurde. Die Lagerungszeit sowie die präparative Aufbereitung der groben Gesteinskörnungen durch Waschen und Sieben kann zu anderen Masseänderungen der Gesteine in der Thermoanalyse führen, welche nicht durch das hier angewendete Verfahren zur Bestimmung des Kalibrierwertes  $C_f$  berücksichtigt wurde.

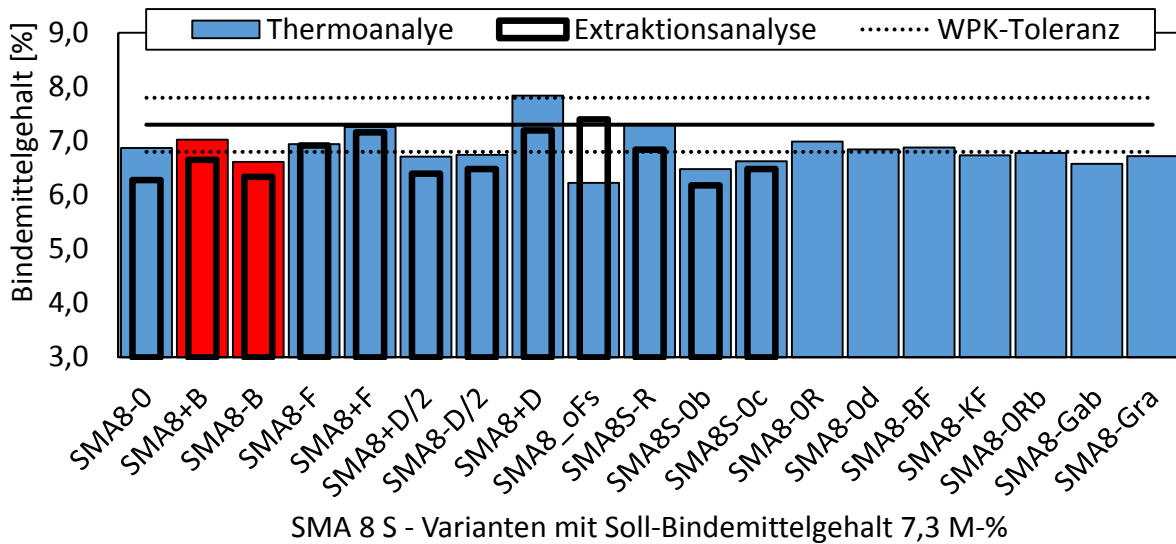


Abbildung 44. Bindemittelgehalte der SMA8S-Varianten mit einem angestrebten Bindemittelgehalt von 7,3 %

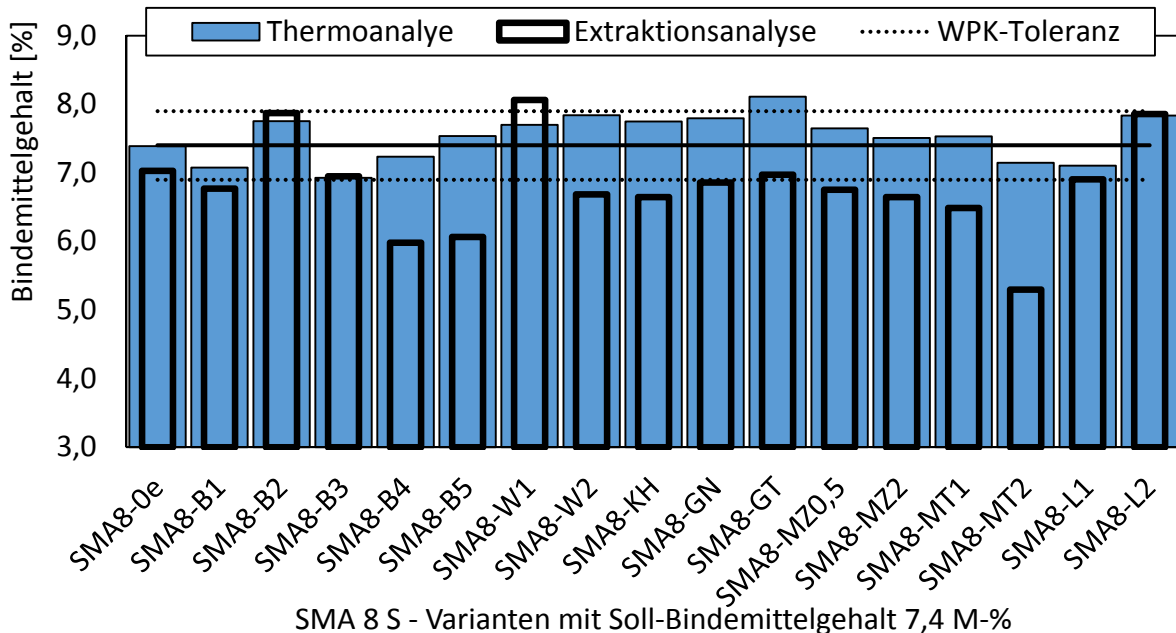


Abbildung 45. Bindemittelgehalte der SMA8S-Varianten mit einem angestrebten Bindemittelgehalt von 7,4 %

Von den 34 Asphaltproben mit angestrebtem Soll-Bindemittelgehalt von 7,3 % (bzw. 7,4 %) werden die WPK-Toleranzen bei 12 Proben unter- bzw. überschritten. Diese Proben sind in Tabelle 18 zusammengestellt. In den an Teilproben durchgeführten Extraktionsanalysen konnten bei fünf der zwölf Proben vergleichbar hohe Abweichungen identifiziert werden, was auf Fehler bei der Mischgutherstellung oder Entmischungserscheinungen hindeuten kann.

#### 4.2.4.2. Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes

Abbildung 46 (links) zeigt die Abweichungen der Korngrößenverteilung (Siebdurchgänge), welche sich aus der jeweiligen Rezeptur der SMA8S-Varianten ergeben. Deutlich ist die Umstellung der Rezeptur bei den Varianten mit gewaschenen groben Gesteinskörnungen zu erkennen, welche vergleichsweise hohe Abweichungen innerhalb der WPK-Toleranz bei den Siebdurchgängen im groben Gesteinskörnungsbereich aufweisen.

**Tabelle 18: Zusammenstellung der SMA8S-Varianten mit Abweichungen des mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes, die über die WPK-Toleranz hinausgehen**

SMA8S-Variante	Soll-Bindemittelgehalt $B_{Soll}$	Thermoanalyse –			Extraktionsanalyse	
		Kalibrierwert $C_f$	Bindemittelgehalt $B_{thermo}$	Differenz zu $B_{Soll}$ $\Delta B_{thermo}$	Bindemittelgehalt $B_{Ex}$	Differenz zu $B_{Soll}$ $\Delta B_{ex}$
SMA8+B	7,8	1,25	7,02	-0,78	6,65	-0,65
SMA8+D/2	7,3	1,27	6,71	-0,59	6,39	-0,91
SMA8-D/2	7,3	1,23	6,74	-0,56	6,48	-0,82
SMA8+D	7,3	1,33	7,84	0,54	7,19	-0,11
SMA8_oFs	7,3	0,98	6,23	-1,07	7,40	0,10
SMA8S-0b	7,3	1,38	6,48	-0,82	6,18	-1,12
SMA8S-0c	7,3	1,46	6,62	-0,68	6,48	-0,82
SMA8-KF	7,3	1,21	6,73	-0,57	keine Extraktionsanalyse durchgeführt	
SMA8-ORb	7,3	1,23	6,78	-0,52		
SMA8-Gab	7,3	0,91	6,58	-0,72		
SMA8-Gra	7,3	0,46	6,72	-0,58		
SMA8-GT	7,4	0,87	8,11	0,71	6,97	-0,43

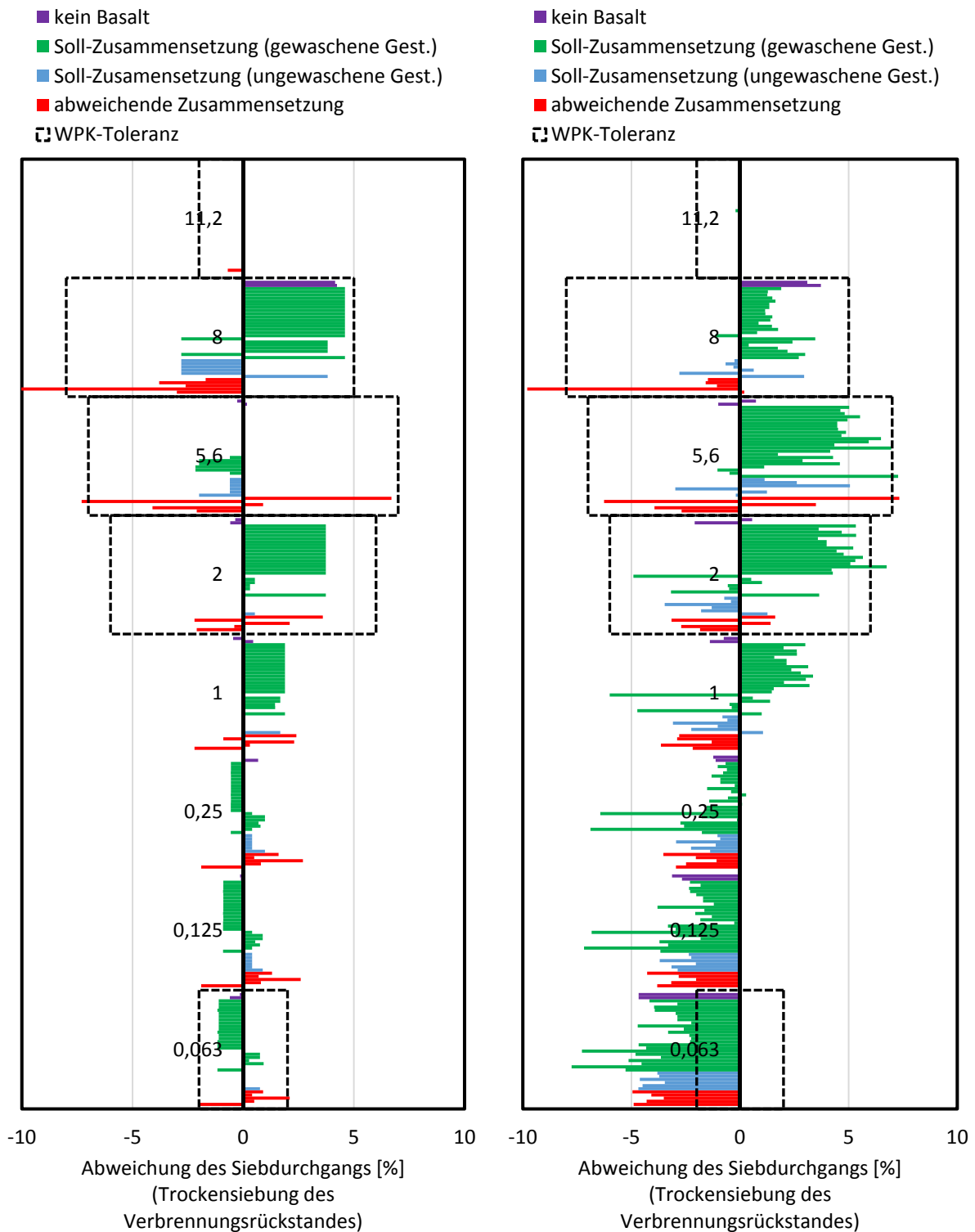
Auf der rechten Seite zeigt Abbildung 46 die Abweichungen zwischen den an den Verbrennungsrückständen nach Thermoanalyse ermittelten Siebdurchgang bei Trockensiebung von der Erstprüfung. Insgesamt weisen die mit gewaschenen Gesteinskörnungen hergestellten SMA8S-Varianten größere Abweichungen auf, die tendenziell die der links gezeigten Soll-Zusammensetzung entsprechen. Auch bei den SMA8S-Varianten ist der erheblich geringe Feinanteil ( $< 0,063$  mm) auffällig, der bei allen Varianten die WPK-Toleranz überschreitet.

In Abbildung 47 sind die entsprechenden Abweichungen der Siebdurchgänge, ermittelt an den extrahierten Gesteinskörnungen nach Heißextraktion (links) sowie durch Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes (rechts) dargestellt. In der Tendenz ergeben sich vergleichbare Unterschiede in den jeweiligen Abbildungen, wobei die Abweichungen im Feinanteil sowie den feinen Gesteinskörnungen bei der Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes geringer sind als bei den extrahierten Gesteinskörnungen.

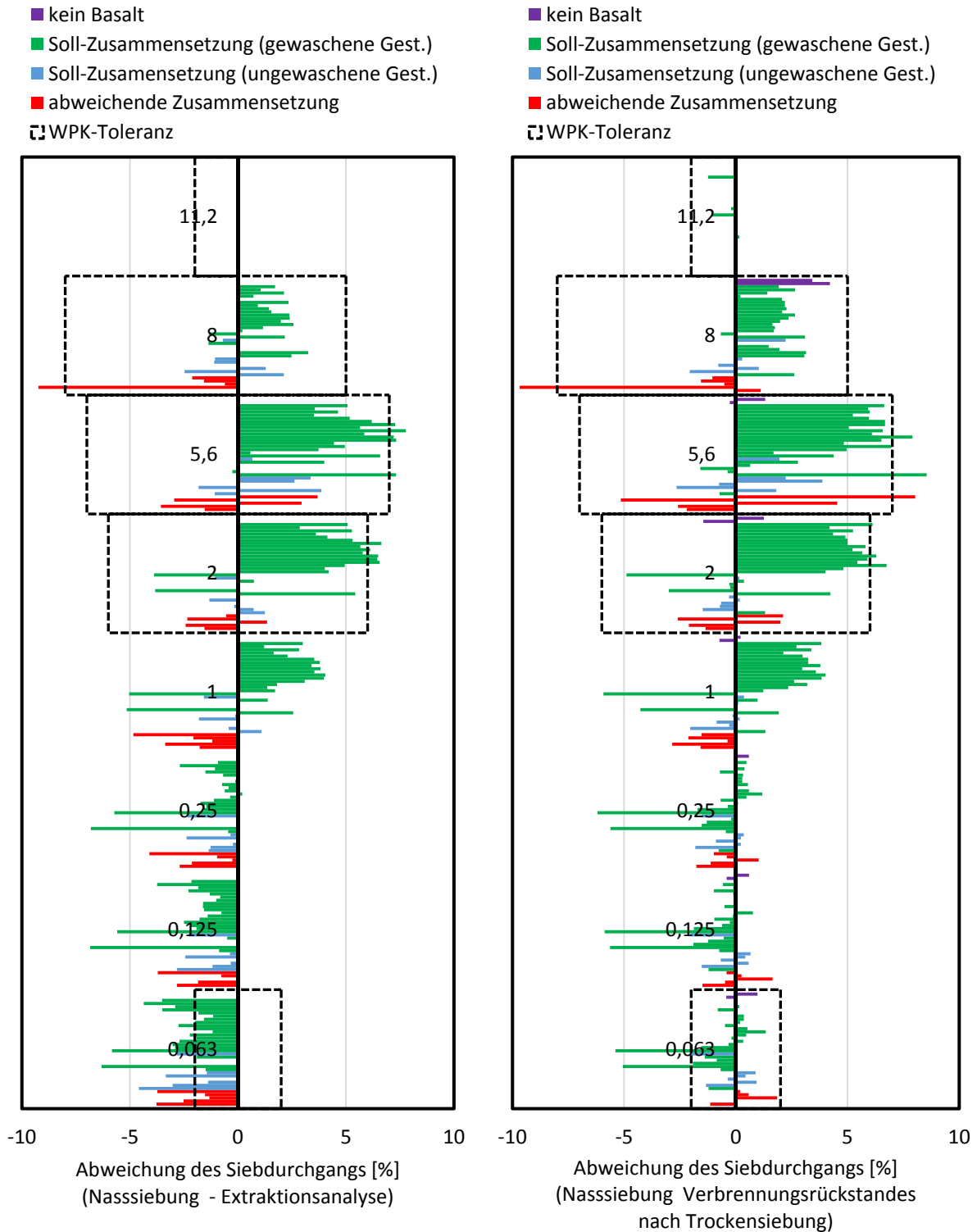
Gemäß der angestrebten Zusammensetzung sollen zwei SMA8S-Varianten Abweichungen in der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches aufweisen, welche zu einer nicht-konformen Bewertung im Rahmen der WPK führen. Diese zwei Varianten sind in Tabelle 21 aufgeführt. Bei Variante SMA8+D wird der zu geringe Siebdurchgang bei 8 mm durch Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes klar identifiziert. Der zu hohe Feinanteil der Variante SMA8+F hingegen wird nicht identifiziert, da die Toleranz um 0,2 % unterschritten wird.

Als konform angestrebte SMA8S-Varianten überschreiten bei insgesamt acht Asphaltvarianten die Abweichungen der Siebdurchgänge, ermittelt durch Nasssiebung nach der Thermoanalyse, die jeweiligen WPK-Anforderungen. Diese Abweichungen werden bei sechs Varianten tendenziell durch die Korngrößenverteilungen der extrahierten Gesteinskörnungen bestätigt, sodass die Abweichungen wahrscheinlich in der Zusammensetzung der Asphaltvarianten begründet sind und nicht nur auf die Prüfverfahren zurückzuführen sind.





**Abbildung 46. Abweichungen der Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische der SMA8S-Varianten; links: Abweichungen der Siebdurchgänge der angestrebten Gesteinskörnungsgemische; rechts: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes**



**Abbildung 47. Abweichungen der Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische der SMA8S-Varianten; links: Abweichungen der Siebdurchgänge, ermittelt am extrahierten Gesteinskörnungsgemisch; rechts: Abweichungen der Siebdurchgänge nach Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes**

**Tabelle 19: Als nicht-konform gemäß DIN EN 13108-21 eingestufte Korngrößenverteilungen der SMA 8 S-Varianten (Soll-Zusammensetzung, sowie Trocken- bzw. Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes nach Thermoanalyse und Heißextraktion)**

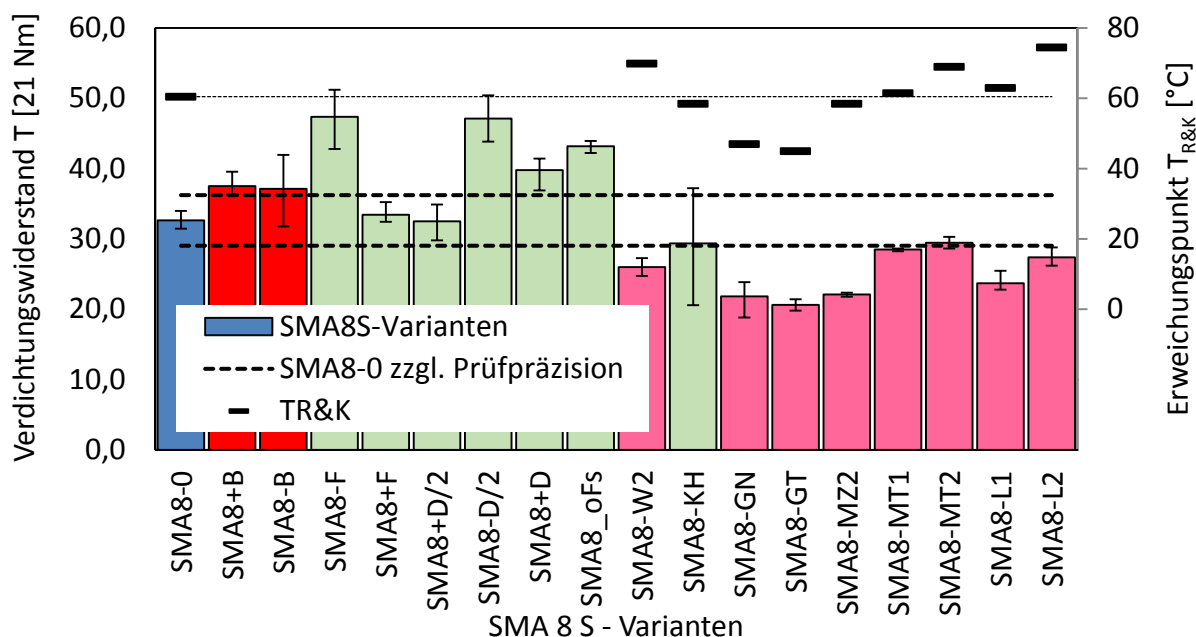
IST	Tatsächliche Abweichungen der Korngrößenverteilung $\Delta_{\text{Soll}}$ [%]	Abweichung des relevanten Siebdurchgangs der Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes $\Delta_{\text{Th.Wet}}$ [%]	Abweichung des relevanten Siebdurchgangs nach Extraktionsanalyse $\Delta_{\text{Ex}}$ [%]
nicht-konform	SMA8+F (< 0,063 mm: +2,1)	<b>+1,8</b>	<b>-1,3</b>
	SMA8+D (< 8 mm: -10,9)	-9,7	-9,2
konform	SMA8-0c (<0,063 mm: +0,1)	<b>-5,4</b>	<b>-5,8</b>
	SMA8-0d (<0,063 mm: +0,1)	<b>-5,1</b>	-
	SMA8-0e (<5,6 mm: $\pm 0$ )	<b>+8,5</b>	<b>+7,3</b>
	SMA8-0Rb (<0,063mm: +0,8)	<b>-2,0</b>	-
	SMA8+D/2 (<5,6 mm: +6,7)	<b>+8,0</b>	+3,7
	SMA8-B3 (< 2mm: +3,7)	<b>+6,7</b>	+4,9
	SMA8-W2 (< 2 mm: +3,7)	<b>+6,1</b>	+5,1
	SMA8-GN (< 2 mm: +3,7)	<b>+6,3</b>	<b>+6,5</b>
<b>fett: gegenüber angestrebter Zusammensetzung fehlerhafte Einschätzung der Konformität</b>			

#### 4.2.4.3. Verdichtungswiderstand

Nach Herstellung der SMA-Varianten wurde der Verdichtungswiderstand T nach TP Asphalt-StB, Teil 10B bestimmt. Aufgrund eines Gerätedefektes konnte diese Asphalteeigenschaft nur bei 18 SMA-Varianten bestimmt werden. Für zehn dieser Varianten wurde auch der Erweichungspunkt Ring & Kugel bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 48 dargestellt. Die Balken zeigen die gemessenen Verdichtungswiderstände für die untersuchten SMA-Varianten. Die gestrichelten Linien stellen den Vergleich zur blau dargestellten Ausgangsvariante SMA8-0 her mit Berücksichtigung der Prüfpräzision des Verfahrens gemäß TP Asphalt-StB, Teil 10B. Während die Variation des Bindemittelgehaltes (rot) nur einen geringen Einfluss auf den Verdichtungswiderstand zeigt, führen Variationen der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches zum Teil zu deutlich höheren Verdichtungswiderständen.

Variationen des eingesetzten Bindemittels (hier: 3 % viskositätsverändernder Zusatz, Einsatz von Gummigranulat sowie Variationen der Mischzeit, der Mischtemperatur sowie der Heißlagerdauer) zeigen ebenfalls einen Einfluss auf den Verdichtungswiderstand. Insbesondere der Vergleich des Verdichtungswiderstandes T mit dem Erweichungspunkt Ring und Kugel der rötlich eingefärbten SMA8-Varianten zeigt, dass Variationen der Mischgutverarbeitung, welche eine Bindemittelverhärtung und demzufolge einen höheren Erweichungspunkt verursachen, auch zu einer Erhöhung des Verdichtungswiderstandes führen.

Da nicht für alle untersuchten SMA8-Varianten der Verdichtungsgrad ermittelt werden konnte, kann keine weiterführende Bewertung des Prüfverfahrens zur Identifikation von abweichenden Mischguteigenschaften für den Einsatz im Rahmen der WPK an Splittmastixasphalten vorgenommen werden.



**Abbildung 48. Verdichtungswiderstand T der Splittmastixasphalte im Vergleich zum Erweichungspunkt Ring & Kugel**

#### 4.2.4.4. Hohlräumegehalt

In Abbildung 49 sind die an Marshall-Probekörpern der SMA8S-Varianten bestimmten Hohlräumegehalte zusammengestellt. Die sich an drei Vergleichswerten orientierenden Wiederholpräzisionen gemäß TP Asphalt-StB, Teil 8 sind als gestrichelte Linien dargestellt. Die Varianten SMA8-0 bis SMA8-0b wurden aus nicht durch Nasssiebung präparativ aufbereiteten Gesteinskörnungen hergestellt. Für diese Varianten, bei denen die Zusammensetzung der Splittmastixasphalte variiert wurde, wurden der Mittelwert der Hohlräumegehalte von den Vergleichsvarianten SMA8-0 und SMA8-0b für die Bestimmung der Grenzen der Wiederholpräzision herangezogen. Ab der Variante SMA8-0c wurden die groben Gesteinskörnungen aus Basalt gewaschen verwendet. Bei den Varianten SMA8-0c bis SMA-Gra erfolgte eine Variation der eingesetzten Gesteinsarten. Die Grenzen der Wiederholpräzision beziehen sich auf den mittleren Hohlräumegehalt der Varianten SMA8-0R und -0Rb. Da weiterhin bei den ausschließlich mit Basaltgestein hergestellten Splittmastixasphalte zu hohe Hohlräumegehalte erzielt wurden, wurden für die verbleibenden Splittmastixasphaltvarianten SMA8-0e bis -L2 die Zusammensetzung der Asphalte variiert und der Bindemittelgehalt auf 7,4 % gesteigert. Hier bezieht sich die eingezeichnete Wiederholpräzision auf den Hohlräumegehalt der Variante SMA8-0e.

Bei Variation der Zusammensetzung der Splittmastixasphalte zeigt die Variante mit verringertem Bindemittelgehalt SMA8-B eine über die Wiederholbarkeit hinausgehenden Anstieg des Hohlräumegehaltes. Weiterhin treten signifikante Abweichungen bei fast allen Varianten auf, bei denen die Korngrößenverteilung variiert wurde. SMA8-F und -D/2 weisen über die Wiederholbarkeit hinausgehende höhere Hohlräumegehalte auf, Varianten SMA8+D/2 und -oFs zu geringe Hohlräumegehalte. Die Verwendung gewaschener Gesteinskörnungen in Variante SMA8-0c führt trotz vorgenommener Anpassung der Zusammensetzung zu deutlich höheren Hohlräumegehalten, die durch die Variante SMA8-0d bestätigt werden.

Für die braun eingefärbten Splittmastixasphalte wurden die Gesteinsarten variiert. So führt der Einsatz von reinen Basalt-Eigenfüller (SMA8-BF) zu einer über die Wiederholbarkeit zu den

Referenzvarianten -0R und -0Rb hinausgehenden Hohlraumgehalt. Die weiteren Variationen resultieren in Abweichungen, welche innerhalb der Wiederholpräzision liegen.

Für die verbliebenen Varianten wurde ausgehend von der Zusammensetzung von Variante SMA8-0e die Bindemittelsorte (rot) sowie die Verarbeitungsart (violett) variiert. Varianten SMA8-0e, -B1 und -B2 wurden unter Verwendung von polymermodifizierten Bitumen der gleichen Sorte 25/55-55A aber verschiedener Lieferanten hergestellt. Trotz ansonsten gleicher Zusammensetzung unterschieden sich die Hohlraumgehalte – für Variante SMA8-B2 sogar über die Wiederholpräzision hinaus. Ebenfalls weist Variante SMA8-B4, die mit Straßenbaubitumen 50/70 hergestellt wurde, einen signifikant geringeren Hohlraumgehalt auf. Als weitere deutliche Abweichung zeigt Variante SMA8-W2, dass hohe Anteile von viskositätveränderndem Zusatz auch zu einem geringeren Hohlraumgehalt führen.

Bei den violett gekennzeichneten Varianten wurde die Mischzeit, die Mischtemperatur bzw. die Heiß-Lagerungsdauer nach Mischgutherstellung variiert. Über die Wiederholpräzision hinaus weist die Variante mit halber Mischzeit (SMA8-MZ0,5) einen geringeren, und die Variante mit 18 h Heißlagerungsdauer im Wärmeschrank (SMA8-L2) einen höheren Hohlraumgehalt auf.

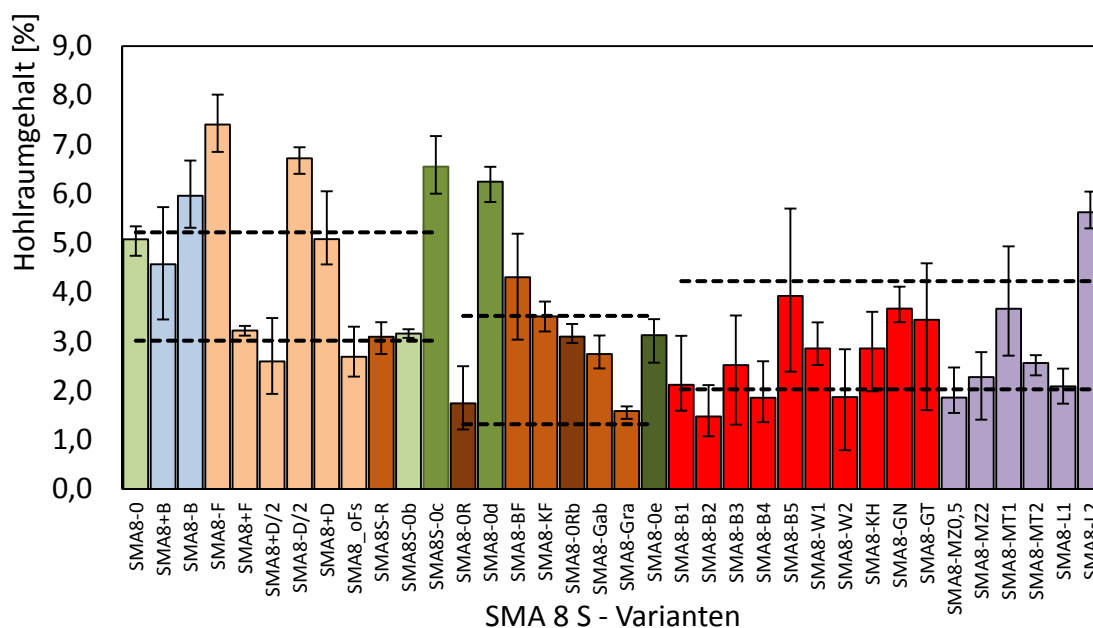


Abbildung 49. An Marshall-Probekörpern der SMA8S-Varianten bestimmte Hohlraumgehalte

#### 4.2.4.5. Marshallstabilität und Fließwert

Die für die Splittmastixasphaltvarianten bestimmten Marshall-Stabilitäten sind in Abbildung 50 dargestellt. Wie in Kapitel 4.2.4.4 erläutert, können drei Gruppen der SMA-Varianten unterschieden werden, für die jeweils die Wiederholpräzisionen in Bezug zu den jeweiligen Vergleichswerten dargestellt sind. Weiterhin zeigen die Kreise die an aus den Mischgutproben zurückgewonnenen Bitumenproben bestimmten Erweichungspunkte  $T_{R&K}$ .

Für folgende Varianten mit variiertem Zusammensetzung kann eine über die Wiederholpräzision hinausgehende Veränderung der Marshall-Stabilität identifiziert werden: SMA8-B, SMA8+F, SMA8-D/2, SMA8+D.

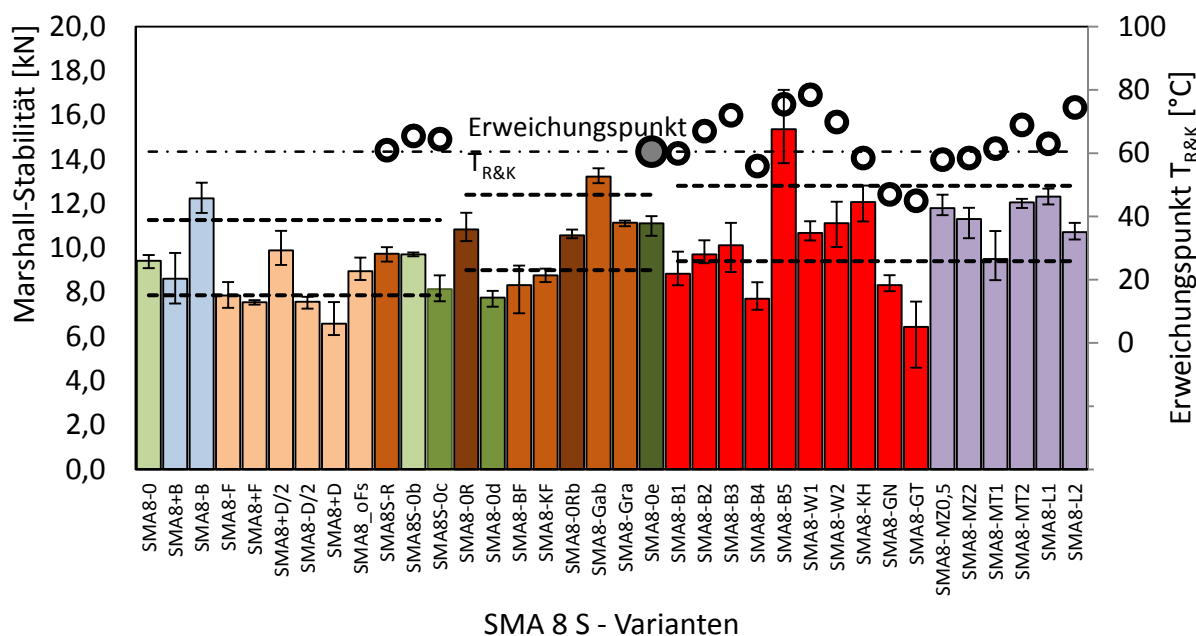
## Werkseigene Produktionskontrolle von Asphalt ohne Lösemittel

Bei den Varianten mit variierten Gesteinsarten weist die vorige Vergleichsvariante SMA8-0d sowie die beiden Varianten mit Feinanteil aus reinem Basalt (SMA8-BF) und Kalksteinmehl (-KF) jeweils die Wiederholpräzision unterschreitende Stabilitäten auf.

Bei den Varianten mit variierten Bindemitteln weisen die Varianten SMA8-B1 (25/55-55A eines anderen Herstellers), -B4 (50/70) sowie die beiden Varianten mit Gummigranulatzugabe Unterschreitungen der Wiederholpräzision auf. Variante SMA8-B5 mit einem Bitumen 10/40-65A weist eine erheblich höhere Marshall-Stabilität auf.

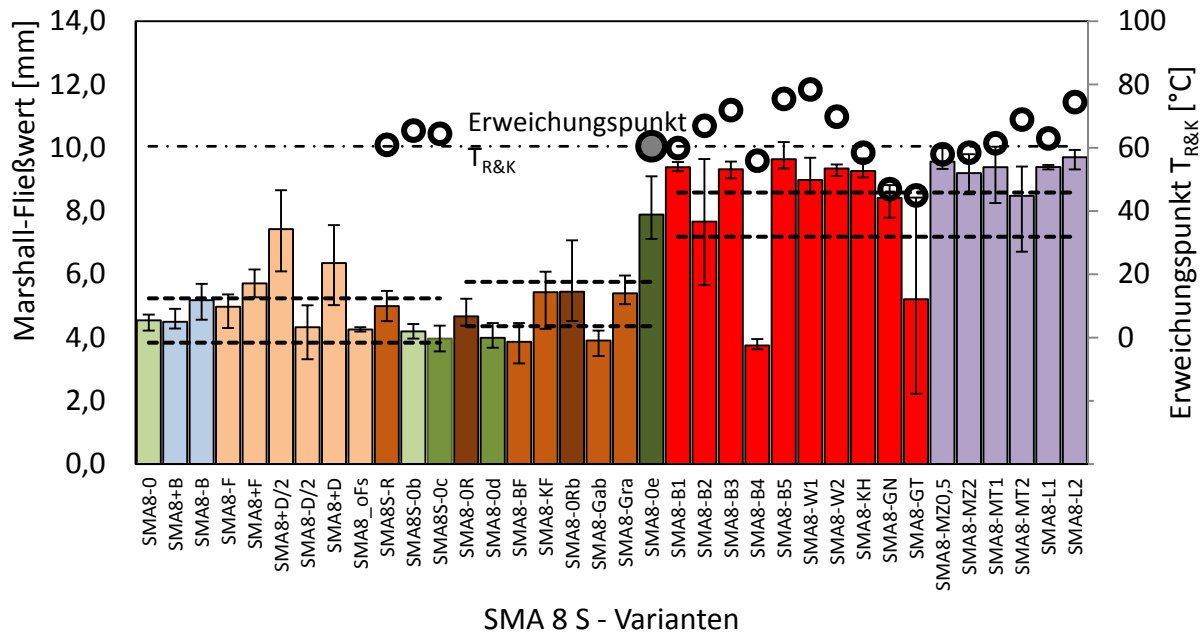
Variationen in der Verarbeitung führen zu keinen, die Wiederholpräzision überschreitende Abweichungen der Marshall-Stabilität.

Insgesamt sind die zwischen den Varianten auftretenden qualitativen Unterschiede der Marshall-Stabilität vergleichbar mit jenen der Erweichungspunkte. Varianten, an denen eine vergleichsweise hohe Marshall-Stabilität bestimmt wurde, weisen auch einen hohen Erweichungspunkt  $T_{R\&K}$  des extrahierten Bindemittels auf.



**Abbildung 50. Marshall-Stabilität der Splittmastixashaltvarianten**

Abbildung 51 zeigt die in den Marshall-Versuchen gemessenen Fließwerte. Hinsichtlich der Variationen der Zusammensetzung überschreiten die Fließwerte der Varianten SMA8+F, +D/2 und +D die Grenze der Wiederholpräzision. Bei den Varianten mit Basaltfüller (SMA8-BF) sowie bei Verwendung von Gabbro als Gesteinskörnung werden die Wiederholpräzision unterschreitende Fließwerte gemessen. Vergleichsweise deutlich variieren die Fließwerte bei Veränderungen der eingesetzten Bindemittel. So weisen die Varianten mit abweichenden Bindemitteln (SMA8-B1, -B3, -B4 und -B5), die Varianten mit Zugabe von viskositätsverändernden Zusätzen (-W1, -W2), die Variante mit Kalkhydratzugabe (-KH) sowie die Variante, mit Gummigranulatzugabe im Nassverfahren (-GT) über die Wiederholpräzision hinausgehende Abweichungen des Fließwertes auf. Ebenso wurde bei den Varianten mit veränderter Verarbeitung – abgesehen von der Variante SMA8-MT2 – eine deutliche Zunahme der Fließwerte gemessen.



**Abbildung 51. Marshall-Fließwert der Splittmastixashaltvarianten**

#### 4.2.4.6. Ergebnisse der Spaltzugversuche

In Abbildung 52 sind die an den Splittmastixasphalten gemessenen Spaltzugfestigkeiten dargestellt. Wie bei den anderen betrachteten Asphaltvarianten wurde die Wiederholpräzision anhand der mittleren an den SMA-Varianten gemessenen Standardabweichung abgeschätzt. Unter Verwendung dieses Schätzwertes resultieren die veränderten Zusammensetzungen der Varianten SMA8-F und +F sowie -oFs und -R in Abnahmen der Spaltzugfestigkeit, während bei der Variante SMA8+D/2 eine deutlich höhere Spaltzugfestigkeit registriert wird.

Bei Variation der eingesetzten Gesteinsarten erreicht die Variante mit Gabbro eine über die Vergleichspräzision hinausgehende Spaltzugfestigkeit.

Von den Varianten mit abweichenden Bindemitteln weisen SMA8-B3, -B5 sowie -GN über die Wiederholpräzision hinausgehende Spaltzugfestigkeiten auf. Ebenso verhält es sich mit den Varianten mit Heißlagerung (SMA8-L1 und -L2).

Abbildung 53 zeigt die in den Spaltzugversuchen gemessenen horizontalen Verformungen bis zum Zeitpunkt des Kraftmaximums. Die vergleichsweise große Versuchsstreuung führt zu hohen Schätzwerten der Wiederholpräzision. Daraus resultiert, dass die Änderungen in der Zusammensetzung und der Gesteinsarten zu Unterschieden führen, welche innerhalb der Präzision liegen. Allerdings weisen die Varianten SMA8-B1, -B4, -GN, -GT sowie -L2 die Grenze der Wiederholpräzision unterschreitende Horizontalverformungen auf.

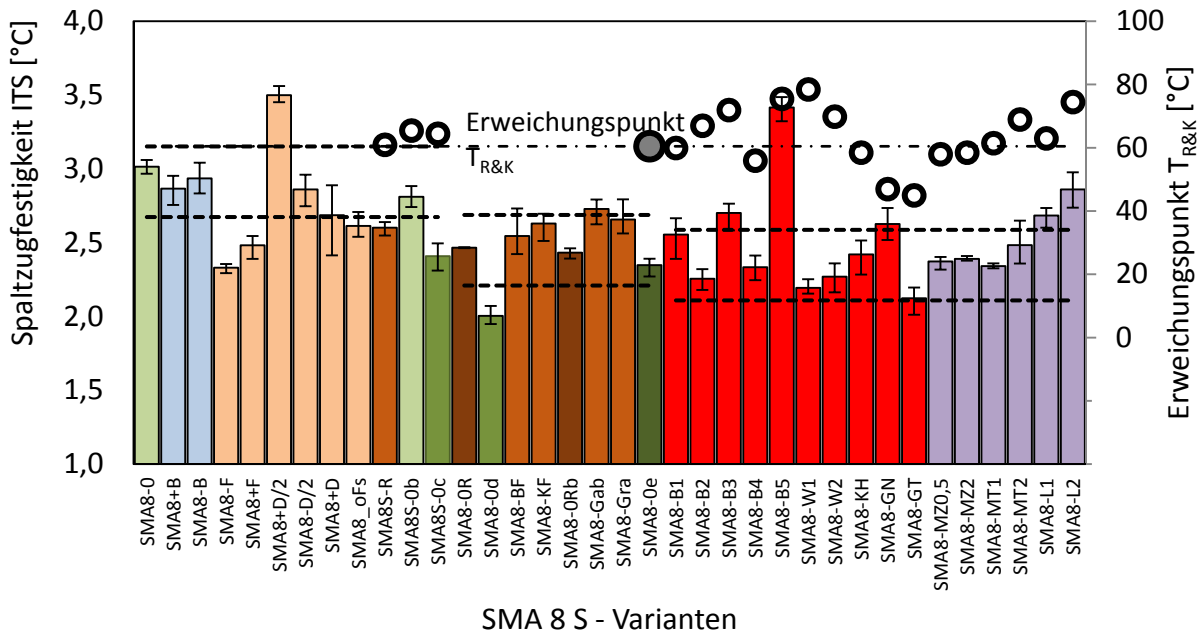


Abbildung 52. An Splittmastixasphaltvarianten bestimmte Spaltzugfestigkeiten

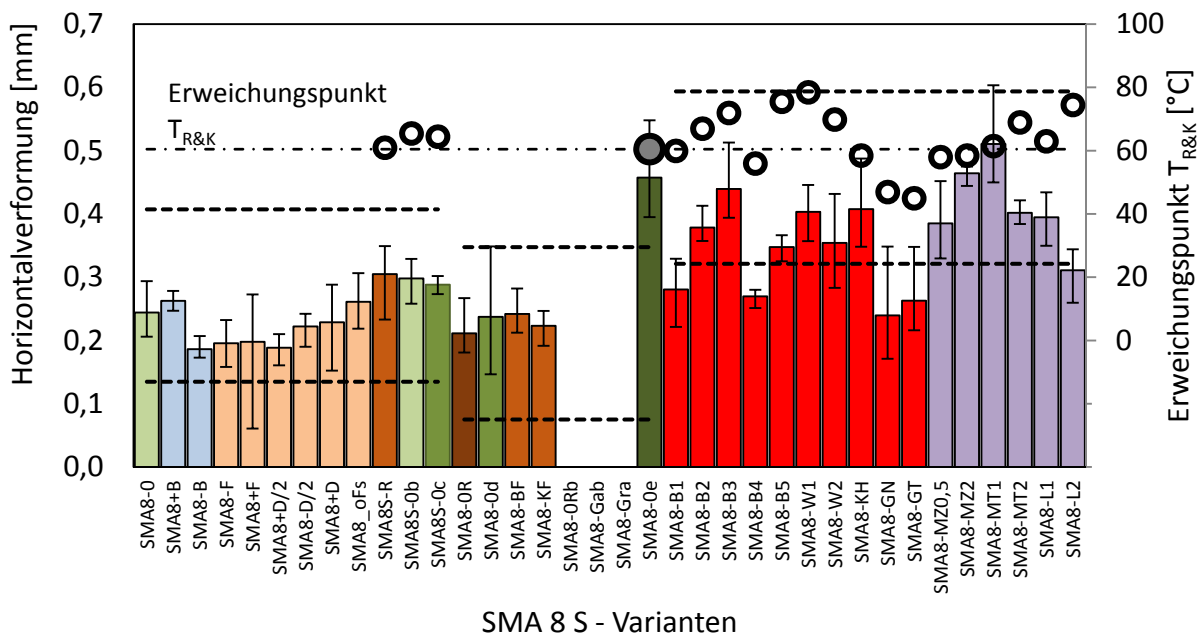
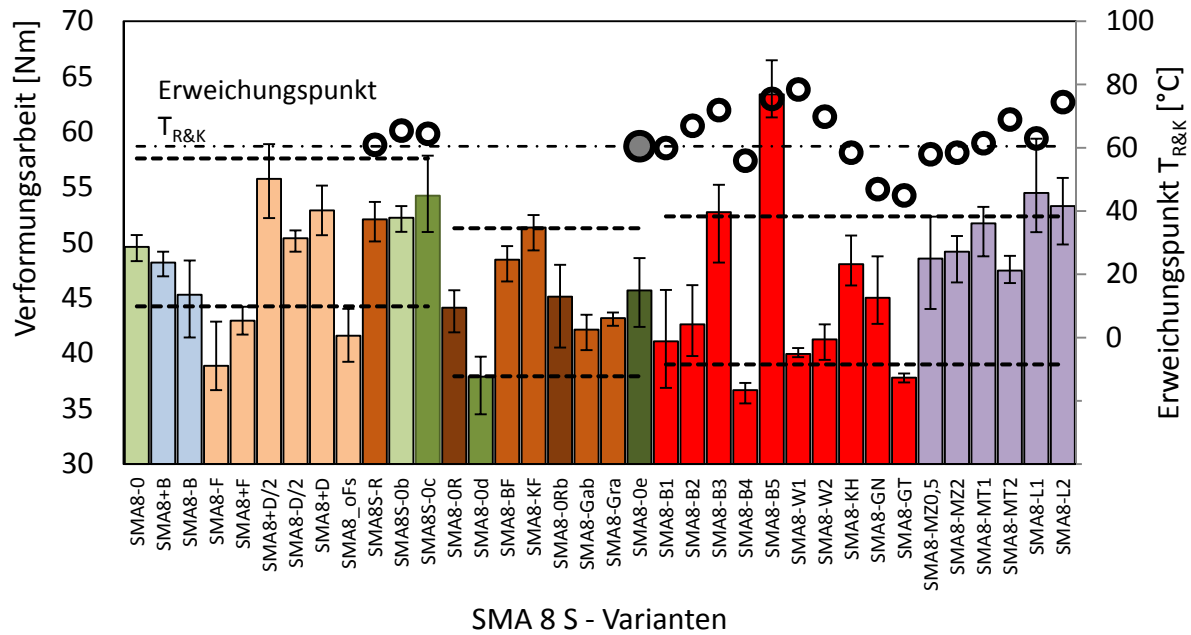


Abbildung 53. In Spaltzugversuchen an Splittmastixasphaltvarianten bestimmte horizontale Verformung

In Abbildung 54 sind die in den Spaltzugversuchen gemessenen Verformungsarbeiten zusammengestellt. Auch hier treten vergleichsweise hohe Streuungen der Ergebniswerte auf, die zu einer großen Spannweite des Schätzwertes der Wiederholungspräzision führen. Dennoch weisen einige Varianten darüber hinausgehende Änderungen der Verformungsarbeit auf. Für die Variation der Zusammensetzung sind dies die Varianten SMA8-F und +F sowie -oFS und für die Änderungen der Bindemittleigenschaften die Varianten SMA8-B4, -B5, -GT sowie -L1 und -L2.





**Abbildung 54.** In Spaltzugversuchen an Splittmastixasphaltvarianten bestimmte Verformungsarbeit

#### 4.2.5. Gussasphalt MA 8 S

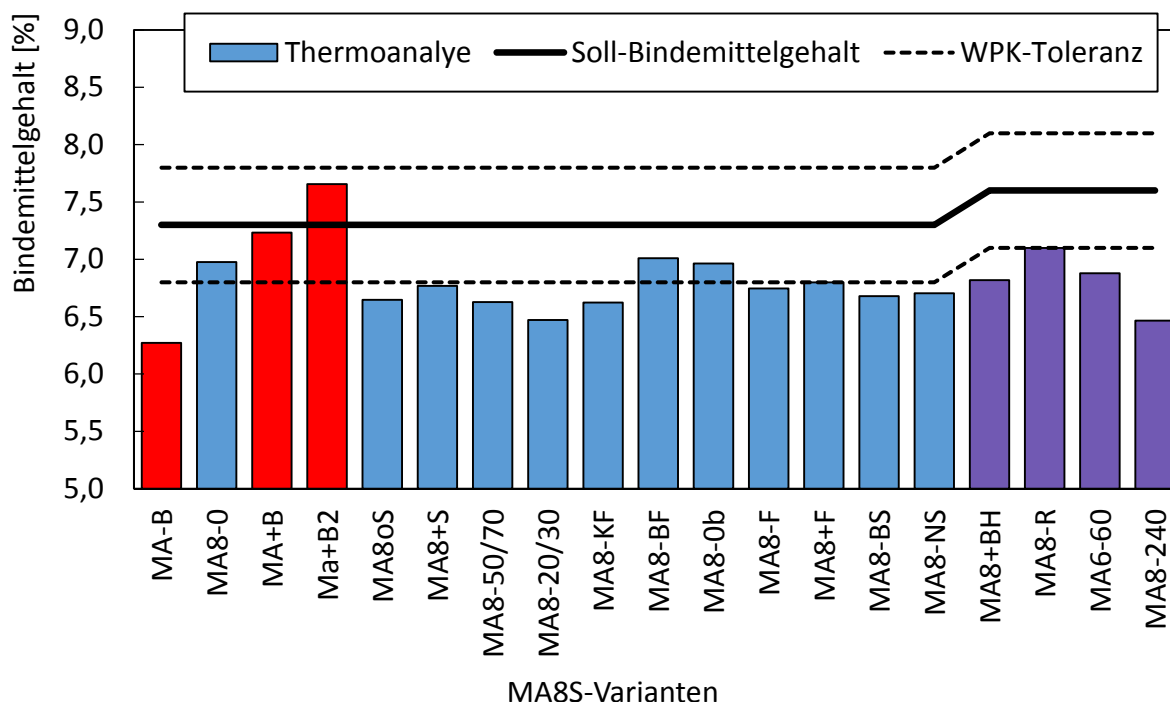
Insgesamt wurden 19 Gussasphaltvarianten im Labor hergestellt und untersucht.

##### 4.2.5.1. Bindemittelgehalt

Mittels Thermoanalyse wurde der Bindemittelgehalt der Gussasphaltvarianten bestimmt. Die gemessenen Bindemittelgehalte sind in Abbildung 55 im Vergleich zu dem Soll-Bindemittelgehalt von 7,3 % sowie den daraus resultierenden WPK-Bindemittelgehaltsgrenzen gemäß DIN EN 13108-21 dargestellt. Bei den drei rot eingefärbten Varianten wurde der Bindemittelgehalt variiert, um zu prüfen, ob diese Änderungen mittels Thermoanalyse erkennbar sind. Die an letzter Stelle aufgeführten, violett eingefärbten Varianten wurden mit einem angestrebten Bindemittelgehalt von 7,6 % hergestellt.

Insgesamt erreichen die mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehalte bei zwölf der untersuchten Varianten nicht die untere Toleranzgrenze der WPK-Grenze – würden demzufolge als nicht-konform eingestuft. Im Mittel wird der Bindemittelgehalt mittels Thermoanalyse um 0,58 % unterschätzt.

Tendenziell können die rot dargestellten Varianten, bei denen der Bindemittelgehalt variiert wurde, von denen mit Soll-Bindemittelgehalt jedoch differenziert werden.

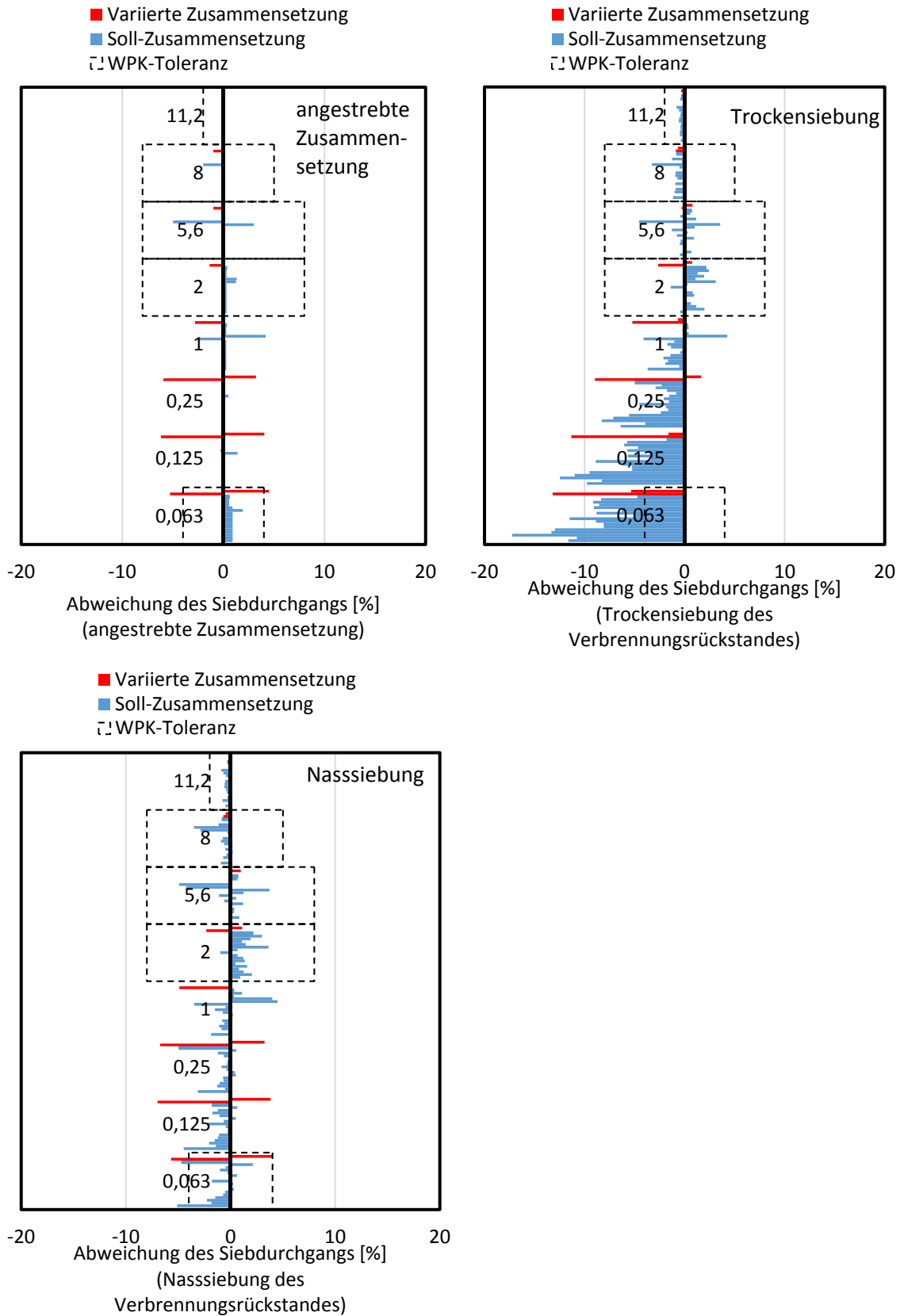


**Abbildung 55. Mittels Thermoanalyse bestimmte Bindemittelgehalte der Gussasphaltvarianten**

#### 4.2.5.2. Korngrößenverteilung

Zwei der 19 untersuchten Gussasphaltvarianten wurden bewusst mit modifizierter Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches zusammengesetzt. Dabei wurde versucht jeweils den Feinanteil um  $\pm 5\%$  zu variieren. In Abbildung 56 sind diese Varianten rot dargestellt. Die Abbildung zeigt rechts oben die mittels Trockensiebung des Verbrennungsrückstandes identifizierten Abweichungen des Gesteinskörnungsgemisches. Das Zusammenhaften des Feinanteils und der feinen Gesteinskörnungen infolge der thermischen Beanspruchung während der Thermoanalyse führen dazu, dass die Siebdurchgänge durch die Siebe  $< 0,25\text{ mm}$  deutlich erhöht sind. Somit unterschreiten die mittels Trockensiebung bestimmten Feinanteile die bei der Rezeptur angestrebten Werte um bis zu 17 M.-%.

Durch anschließende Nasssiebung können diese Anhaftungen gelöst werden, sodass nur vereinzelte Abweichungen des Feinanteils identifiziert werden können. Auch können sowohl der zu geringe als auch der zu hohe Feinanteil der beiden Gussasphalte mit verändertem Feinanteil erkannt werden. Die bestimmten Abweichungen der Korngrößenverteilung von diesen beiden nicht-konformen Gussasphaltvarianten sind in Tabelle 20 aufgeführt. Darin sind weiterhin zwei Gussasphaltvarianten genannt, bei welchen die Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes ebenfalls in Abweichungen des Feinanteils resultieren, welche die WPK-Toleranz überschreiten, obwohl diese Varianten ohne Abweichung des Gesteinskörnungsgemisches konzipiert waren.



**Abbildung 56. Abweichungen der Korngrößenverteilungen der MA8S-Varianten; links oben: Abweichungen der angestrebten Zusammensetzung, rechts oben: Abweichungen der Siebdurchgänge der Trockensiebung; unten: Abweichungen der Siebdurchgänge der Nasssiebung**

**Tabelle 20: Als nicht-konform gemäß DIN EN 13108-21 eingestufte Korngrößenverteilungen der MA 8 S-Varianten gemäß der Ergebnisse der Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes nach Thermoanalyse**

IST	Tatsächliche Abweichungen der Korngrößenverteilung $\Delta_{\text{Soil}}$ [%]	Abweichung des relevanten Siebdurchgangs der Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes $\Delta_{\text{Th.Wet}}$ [%]
nicht-konform	MA8+F (< 0,063 mm: +4,5 %)	+4,0
	MA8-F (< 0,063 mm: -5,3 %)	-5,6
konform	MA8-B (< 0,063 mm: +0,9 %)	<b>-5,6 %</b>
	MA8-240 (< 0,063 mm: +0,9 %)	<b>-4,6 %</b>

#### 4.2.5.3. Stempeleindringtiefe

An aus den Mischgutvarianten hergestellten Probewürfeln wurde die statische Stempeldringtiefe nach TP Asphalt-StB, Teil 20 bestimmt. Um möglichst früh ein Ergebnis zu den mechanischen Eigenschaften zu erlangen wurden zwei Probewürfel direkt am Tag der Mischgut und Probekörperherstellung geprüft. Dazu wurden die Probewürfel nach Erreichen der Raumtemperatur direkt in das Wasserbad der Prüfeinrichtung überführt. Nach einer Temperierzeit von 60 Minuten wurde die Stempeleindringtiefe bestimmt. Zwei weitere Probekörper wurden gemäß der Prüfvorschrift erst nach einer Lagerdauer von mindestens 24 Stunden geprüft.

Die für die Gussasphaltvarianten am Herstelltag bestimmten Stempeleindringtiefen sind als farbige Balken in Abbildung 57 dargestellt. Ausgehend von der dunkelblau eingefärbten Ausgangsmischung MA8-0 zeigen die gestrichelten Linien die Prüfpräzision nach TL Asphalt-StB, Teil 20. Die mit gleicher Zusammensetzung hergestellte Variante MA8-0b liegt dabei knapp innerhalb des Präzisionsbereichs.

Es ist ersichtlich, dass zahlreiche Gussasphaltvarianten über die Präzision hinausgehende Unterschiede zum Ausgangsmischgut aufweisen. Demnach können Gussasphalte mit Abweichungen der Asphalteigenschaften aber gleicher Zusammensetzung (Bindemittelgehalt Korngrößenverteilung) anhand der Stempeleindringtiefe identifiziert werden. Im Folgenden werden diese Unterschiede diskutiert.

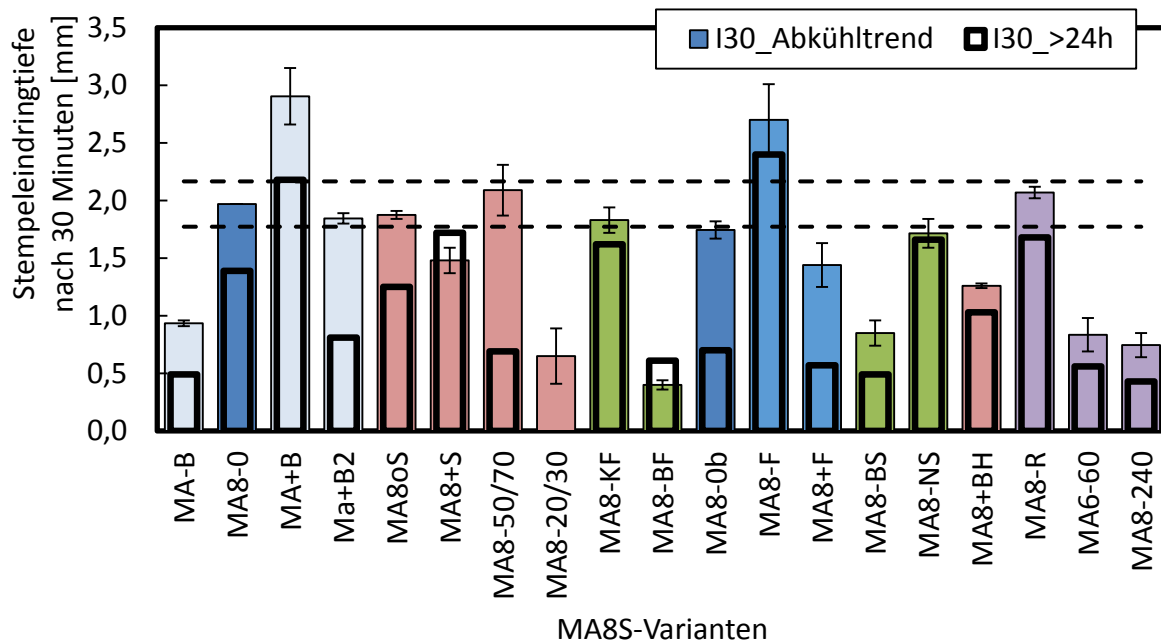
Die Gussasphaltvarianten mit variierten Bindemittel- bzw. Füllergehalt sind hellblau dargestellt. Hier zeigt sich ein hoher Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Stempeleindringtiefe. Ausgehend von der Ausgangsmischung, resultiert ein um 0,3 % geringerer Bindemittelgehalt in kleinerer, ein um 0,3 % höherer Bindemittelgehalt in einer höheren Eindringtiefe. Insgesamt liegt hier ein recht „trockener“ Gussasphalt vor, der offensichtlich noch Hohlräume enthält. Ein weiterer Anstieg des Bindemittelgehaltes um 0,6 % gegenüber der Ausgangsmischung resultiert in vergleichbar hoher Eindringtiefe. Auch die Variation des Füllergehaltes innerhalb der WPK-Toleranz hat deutliche Auswirkungen auf die Stempeleindringtiefe.

Rot eingefärbt sind die Gussasphaltvarianten, bei denen bei gleicher Zusammensetzung das Bindemittel variiert wurde. Ausgehend von dem Bindemittel 30/45 mit 2 % viskositätsverändernden Zusatz (Sasobit) resultiert der Gussasphalt ohne Zugabe des Zusatzes in vergleichbar hoher Eindringtiefe, während die doppelte Zugabe von Sasobit (4 %) zu einer Verringerung der Stempeleindringtiefe führt. Ebenso wirkt sich der Einsatz von weicherem (50/70) bzw. stei-

ferem (20/30) Bindemittel plausibel auf die Stempel Eindringtiefe aus. Somit erscheint es möglich, Gussasphalte, denen falsche Bindemittel zugegeben wurden, anhand der Stempel Eindringtiefe identifizieren zu können.

Bei den grün eingefärbten Varianten wurde die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches variiert. Bei der Variation des zugegebenen Füllers zeigt sich der große Einfluss auf die versteifende Wirkung. So führt der Einsatz reinen Basalt-Eigenfüllers zu einer erheblich geringeren Stempel Eindringtiefe als der Einsatz von Kalksteinfüller. Ebenso zeigt sich eine geringere Eindringtiefe beim ausschließlichen Einsatz von Brechsand gegenüber dem Einsatz von Natursand.

Die violett gefärbten Varianten zeigen den Einfluss variiertes Mischzeit im Labormischer. Dabei kam ein höherer Bindemittelgehalt zur Anwendung als bei dem Ausgangsmischgut zum Einsatz. Die Verlängerung der Mischzeit im Labormischer auf 60 Minuten bzw. 240 Minuten führt zu einer Versteifung des Gussasphaltes.



**Abbildung 57. An den Gussasphaltvarianten bestimmte Eindringtiefen**

Anhand der Stempel Eindringtiefe können infolge variiertes Bitumenzugabe oder verlängerter Mischzeit in den Bindemittleigenschaften abweichende Gussasphalte relativ gut identifiziert werden. Dabei bewirken aber weitere Variationen der Asphalteigenschaften ebenfalls Abweichungen ähnlicher oder mitunter höherer Größenordnung. Dadurch kann nicht anhand der Stempel Eindringtiefe auf die Bindemittleigenschaften geschlossen werden. In Kombination mit den Ergebnissen der Thermoanalyse zur Zusammensetzung kann allerdings die Abweichung eingegrenzt werden. Da sich auch die Variation der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches (Brech- bzw. Natursand und Füllerart) erheblich auf die Stempel Eindringtiefe auswirken, werden auch diese Abweichungen erkannt, welche bei der herkömmlichen WPK bei Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel nicht auffällig gewesen wären.

Die vor den farbigen Balken liegenden schwarze Markierungen zeigen die Stempel Eindringtiefe bei Prüfung der Probewürfel normgerecht frühestens nach 20 Stunden. Bis auf zwei Aus-

nahmen werden geringere Stempel Eindringtiefen gemessen als bei der Prüfung am Herstelltag. Dies zeigt, dass ein Vergleich mit der Stempel Eindringtiefe der Erstprüfung des Gussasphaltes nicht aussagekräftig hinsichtlich der Konformität einer im Rahmen der WPK am Herstelltag untersuchten Gussasphaltprobe ist.

### **4.3. Validierung durch Begleitung einer echten WPK**

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der lösemittelfreien Prüfverfahren wurde die an sechs Asphaltvarianten durchgeführte werkseigene Produktionskontrolle zweier Mischwerke eines mittelständischen Unternehmens begleitet. Dazu wurden zu den Zeitpunkten der WPK-Probenahmen weitere Asphaltmischgutproben entnommen. Weiterhin wurden für jeden Probenahmetag Proben der in dem jeweiligen Asphaltmischgut verwendeten Gesteinskörnungen sowie Asphaltgranulate genommen. Auf diese Weise wurden neun Mischgutproben für Asphaltdeckschichten sowie 19 Asphaltbetonproben für Asphalttragschichten mit Zugabe von Asphaltgranulat untersucht.

Die Thermoanalyse wurde zweifachbelegt durchgeführt. Bei der Verfahrensüberprüfung im Labor wurde die Bestimmung des Kalibrierwertes zur Berücksichtigung der Masseänderung der Gesteinskörnungen als wesentliche Einflussgröße bei der Bindemittelgehaltsbestimmung identifiziert. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Untersuchungen an WPK-Proben zwei Verfahren der Kalibrierwertbestimmung parallel durchgeführt:

- Bestimmung des Kalibrierwertes durch Thermoanalyse an Trockenmischung der Gesteinskörnungen und des Asphaltgranulates (A.4). Bei den Asphalttragschichtproben wurden dabei zwei verschiedenen Bindemittelgehalte des Asphaltgranulates angenommen. Zunächst der in der Erstprüfung verwendete Wert (hier: 4,0 %). Als zweiter Wert wurde ein Bindemittelgehalt von 4,25 % des Asphaltgranulates angenommen, der sich beim Vergleich der am Asphaltgranulat bestimmten Masseverluste und jenem, die am Asphaltmischgut mit bekanntem Bindemittelgehalt ergab.
- Bestimmung des Kalibrierwertes als gleitenden Mittelwert anhand der zuvor bestimmten Abweichungen zwischen Masseverlust nach Thermoanalyse und dem Soll-Bindemittelgehalt (modifiziertes Verfahren A.2).

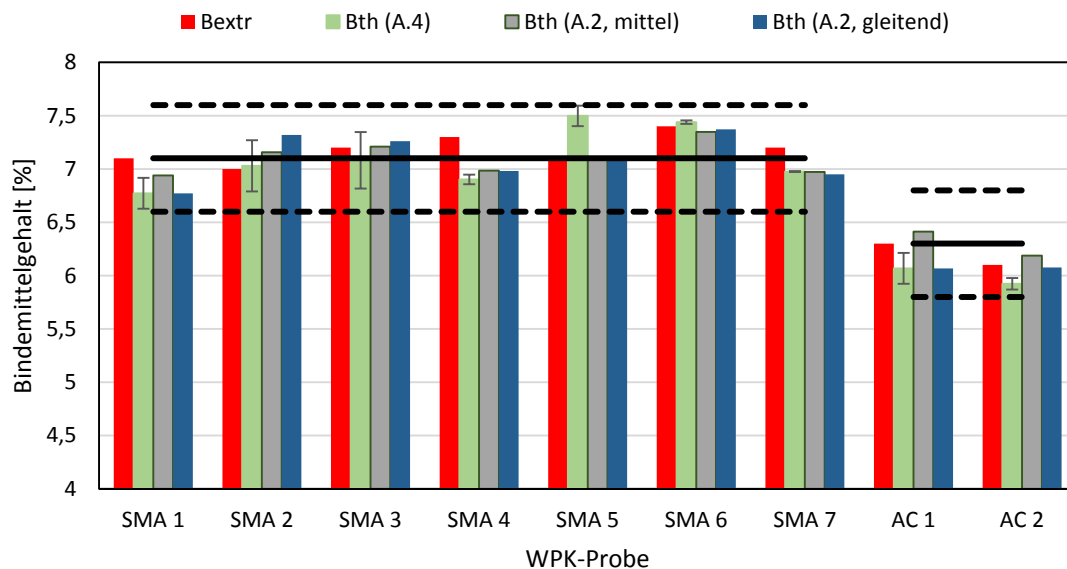
Durch Nass- und Trockensiebung konnte die Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches bestimmt werden. Aus dem Asphaltmischgut wurden Marshallprobekörper hergestellt, an denen der Hohlraumgehalt ermittelt wurde sowie Marshallversuche und Spaltzugversuche durchgeführt wurden. Weiterhin wurde der Verdichtungswiderstand bestimmt.

#### **4.3.1. Ergebnisse der WPK an SMA 8 S und AC 8 DS**

Die an den Deckschichtasphaltproben bestimmten Bindemittelgehalte sind in Abbildung 58 dargestellt. Die horizontalen Linien zeigen die Bindemittelgehalte gemäß Erstprüfung sowie die darauf angerechneten WPK-Toleranzen. Die rot markierten Werte repräsentieren die herkömmlich mittels Extraktionsverfahren bestimmten Bindemittelgehalte. Die grün markierten Werte zeigen die mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehalte bei Anwendung des an einer Trockenprobe des Gesteinskörnungsgemisches bestimmten Kalibrierwertes. Hier treten relativ große Abweichungen zu den Ergebnissen der Extraktionsanalyse auf. Die blau markierten Werte zeigen die Bindemittelgehalte, die sich bei Anwendung eines Kalibrierwert ergeben, der der Abweichung zwischen Masseverlust der Thermoanalyse und dem angestrebten Soll-Bindemittelgehalt des Mischgutes entspricht. Bei den grauen Werten wurde ein einheitlicher Kalibrierfaktor angewendet, der sich aus dem Mittelwert aller gemessenen Einzelproben

ergibt. Bei den dunkelblau markierten Werten wurde ein gleitender Mittelwert aus den vorgehenden WPK-Analysen verwendet. Für die jeweils erste Probe (SMA1 bzw. AC1) wurde der an der Trockenprobe bestimmte Kalibrierwert verwendet.

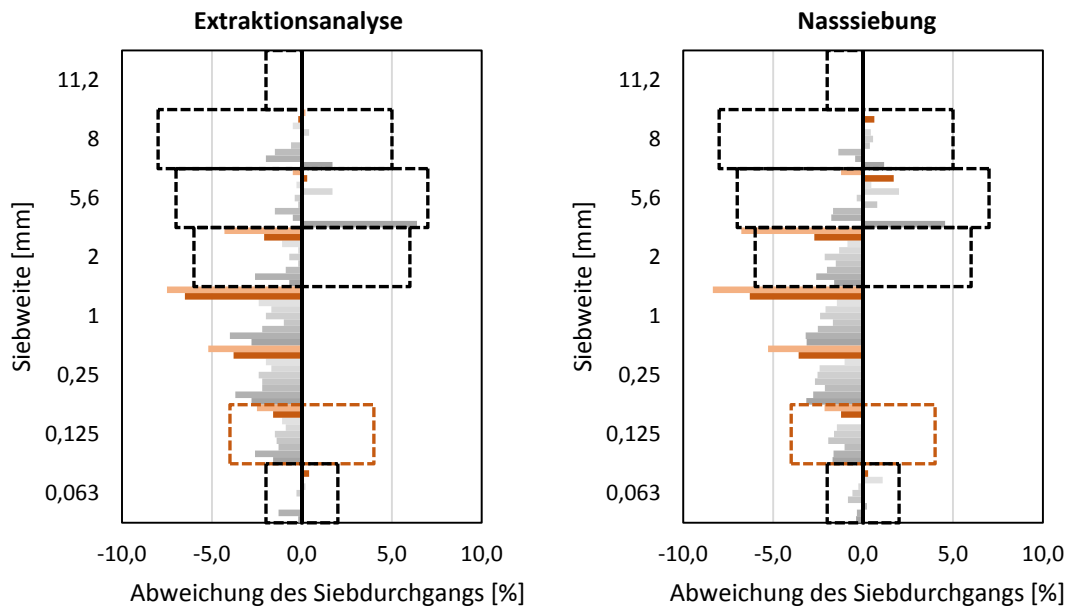
Insgesamt liegen alle neun untersuchten Asphaltproben innerhalb der WPK-Toleranz, unabhängig vom angewendeten Verfahren der Bindemittelgehaltsbestimmung. Ein Zusammenhang zwischen den mittels Extraktionsverfahren und den verschiedenen mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehalten ist nicht erkennbar.



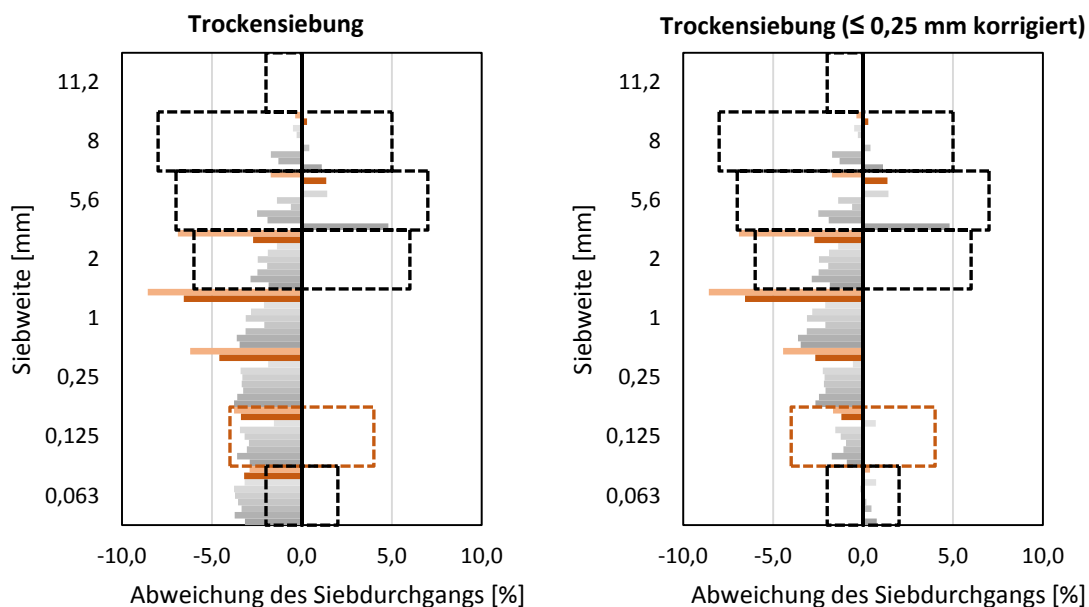
**Abbildung 58. An WPK-Proben der Deckschichtasphalte bestimmte Bindemittelgehalte bei Anwendung verschiedener Bestimmungsmethoden**

Die Ergebnisse der Siebanalysen zur Überprüfung der Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische sind in Abbildung 59 und 60 dargestellt. Die an den SMA-Proben ermittelten Siebdurchgänge liegen sowohl bei Bestimmung nach Extraktionsanalyse als auch nach Thermoanalyse innerhalb der WPK-Toleranzen, abgesehen von den zu geringen Feinanteilen nach Trockensiebung. Dieser zu geringe Feinanteil kann mit dem anhand der Laboruntersuchungen bestimmten Faktor von 1,5 korrigiert werden. In gleicher Weise wurde der Siebdurchgang bei 0,125 mm mit dem Faktor 1,2 und jener bei 0,25 mm mit dem Faktor 1,1 multipliziert. Mit Hilfe dieser Korrekturen wird eine gute Annäherung an die Ergebnisse der Nasssiebung erreicht.

Bei allen Verfahren kann die vergleichsweise große Abweichung der untersten SMA-Probe (SMA1) beim Siebdurchgang von 5,6 mm erkannt werden. Weiterhin fallen die größeren Abweichungen der AC-Proben bei den feinen Gesteinskörnungen auf. Dabei unterschreitet Probe AC2 nach der Thermoanalyse auch die WPK-Toleranz für den Siebdurchgang bei 2 mm. Das Ergebnis der Extraktionsanalyse zeigt ebenfalls eine deutliche Unterschreitung des Siebdurchganges der Erstprüfung, die allerdings innerhalb der Toleranz liegt.



**Abbildung 59.** Abweichung der an den WPK-Proben bestimmten Siebdurchgängen zu den Siebdurchgängen gemäß Erstprüfung. grau: SMA-Proben, rot: AC-Proben. links: nach Extraktionsanalyse, rechts: Nasssiebung nach Thermoanalyse



**Abbildung 60.** Abweichung der an den WPK-Proben bestimmten Siebdurchgängen zu den Siebdurchgängen gemäß Erstprüfung. grau: SMA-Proben, rot: AC-Proben. links: Trockensiebung nach Thermoanalyse, rechts: Trockensiebung, korrigiert

Die Ergebnisse der an Marshall-Probekörpern durchgeführten Untersuchungen sind in Abbildung 61 zusammengestellt. Für Verdichtungswiderstand, Marshall-Stabilität und Fließwert sind jeweils die Mittelwerte der je Asphaltart bestimmten Kennwerte aufgetragen sowie die sich aus den Wiederholpräzisionen ergebenden Abweichungen als horizontale Bezugslinien eingezeichnet.



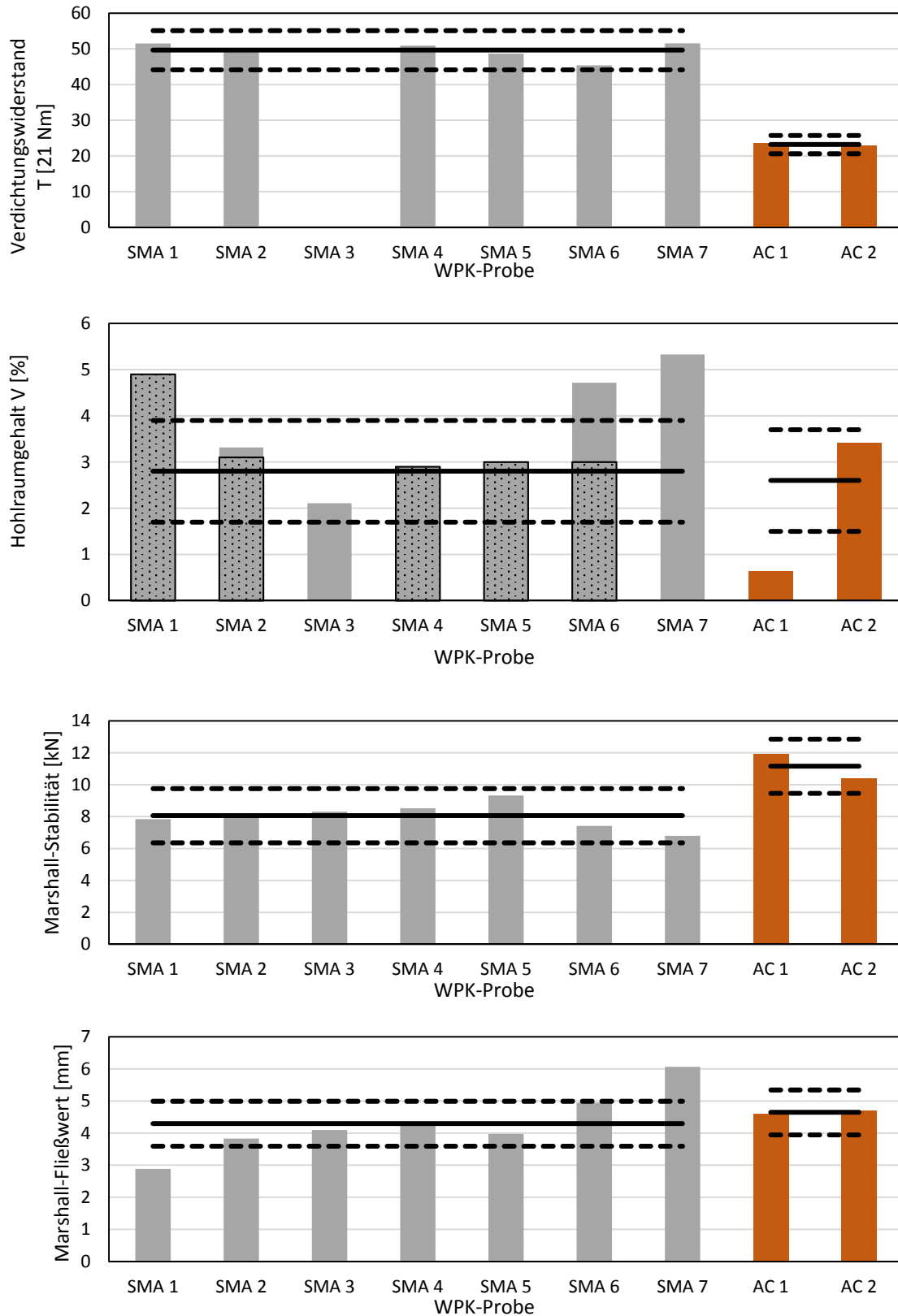


Abbildung 61. Ergebnisse der Prüfungen an Marshall-Probekörpern im Rahmen der lösemittel-freien WPK

Für den Verdichtungswiderstand ergeben sich keine auffälligen Werte, abgesehen von Probe SMA 6 mit einem vergleichsweise niedrigen Wert. Hinsichtlich des Hohlraumgehaltes des Marshall-Probekörpers ergeben sich hohe Abweichungen von dem in der Erstprüfung genannten Sollwert, der als durchgezogene Bezugslinie dargestellt ist. Insbesondere Proben SMA 1, 6 und 7 weisen deutlich zu hohe Hohlraumgehalte auf. Nur bei Probe SMA 1 wird der Wert tendenziell vom im Rahmen der tatsächlichen WPK ermittelten, gepunktet dargestellten Hohlraumgehalt bestätigt. Der höhere Hohlraumgehalt dieser Probe kann im Zusammenhang stehen mit den zu hohen Siebdurchgängen des 5,6 mm-Siebes, welche in den Siebanalysen ermittelt wurden. Die in Proben SMA 6 und 7 bestimmten hohen Hohlraumgehalt stehen hingegen nicht im Zusammenhang mit auffälligen Abweichungen der Zusammensetzung.

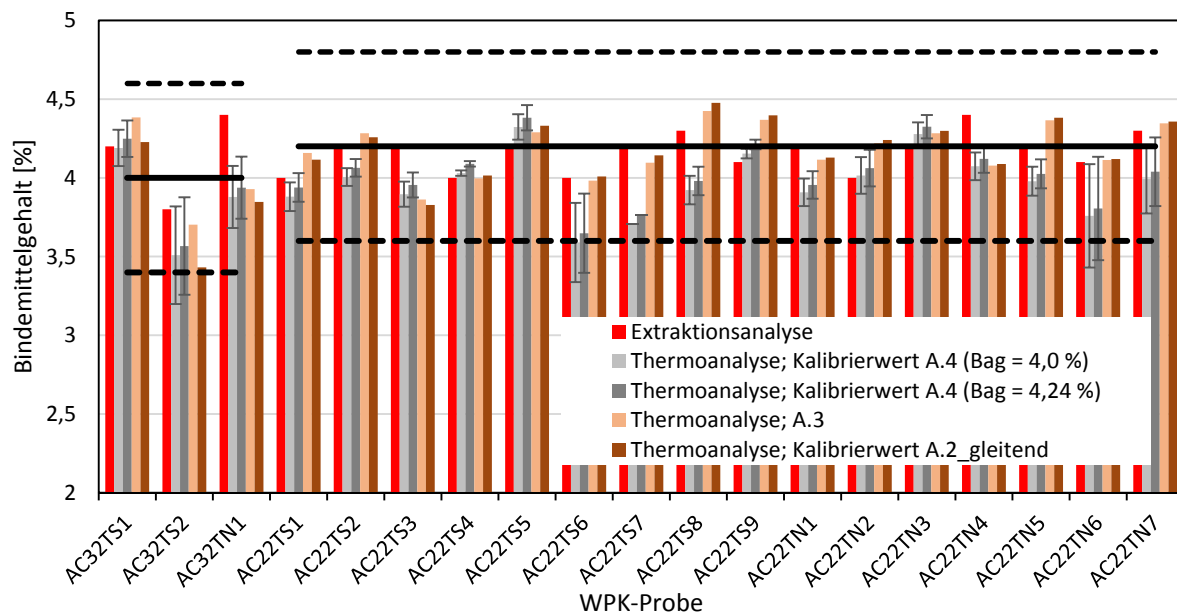
Hinsichtlich der Marshall-Stabilität liegen alle ermittelte Werte im Rahmen der Wiederholpräzision. Die im Hohlraumgehalt auffälligen Proben SMA 6 und 7 weisen hier auch vergleichsweise niedrige Stabilitäten auf. Beim Marshall-Fließwert weisen die im Hohlraumgehalt auffälligen Varianten ebenfalls Abweichungen vom Mittelwert auf, die über die Wiederholpräzision hinausgehen.

#### **4.3.2. Ergebnisse der WPK an Asphaltmischgut für Asphalttragschichten**

Die Verfahren der lösemittelfreien WPK wurden ebenfalls an aus der großtechnischen Herstellung entnommenen Proben von Asphaltbetonmischgut für Asphalttragschichten angewendet. Es wurden dabei Proben der Sorte AC 32 S, AC 32 N (jeweils mit einem Soll-Bindemittelgehalt von 4,0 %) sowie AC 22 S und AC 22 N (mit einem Bindemittelgehalt von 4,2 %) untersucht. Allen Asphaltvarianten wurde 25 % (S-Sorten) bzw. 20 % (N-Sorten) Asphaltgranulat zugegeben.

Die mittels Extraktionsverfahren in der herkömmlichen WPK sowie mittels Thermoanalyse mit verschiedenen Verfahren der Kalibrierwertbestimmung gemessenen Bindemittelgehalte sind in Abbildung 62 zusammengestellt. Zunächst liegen alle ermittelten Bindemittelgehalte innerhalb der durch die DIN EN 13108-21 vorgegebenen Toleranz von  $\pm 0,6$  % vom Wert der Erstprüfung. Insbesondere die Bindemittelgehalte, welche bei Verwendung der an Trockenmischungen bestimmten Kalibrierwerte mittels Thermoanalyse ermittelt wurden, weisen bei vier Proben (AC32TS2, AC22TS6, AC22TS7 und AC22TN6) vergleichsweise geringe Werte auf. Insgesamt variieren die so ermittelten Bindemittelgehalte auch deutlich stärker als die mit den gemittelten Kalibrierwerten bestimmten, da der Einfluss der individuellen Kalibrierwertbestimmung am Trockengemisch entfällt.

Der Zusammenhang der mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehalte zu den mittels Extraktionsanalyse bestimmten ist nur tendenziell erkennbar.



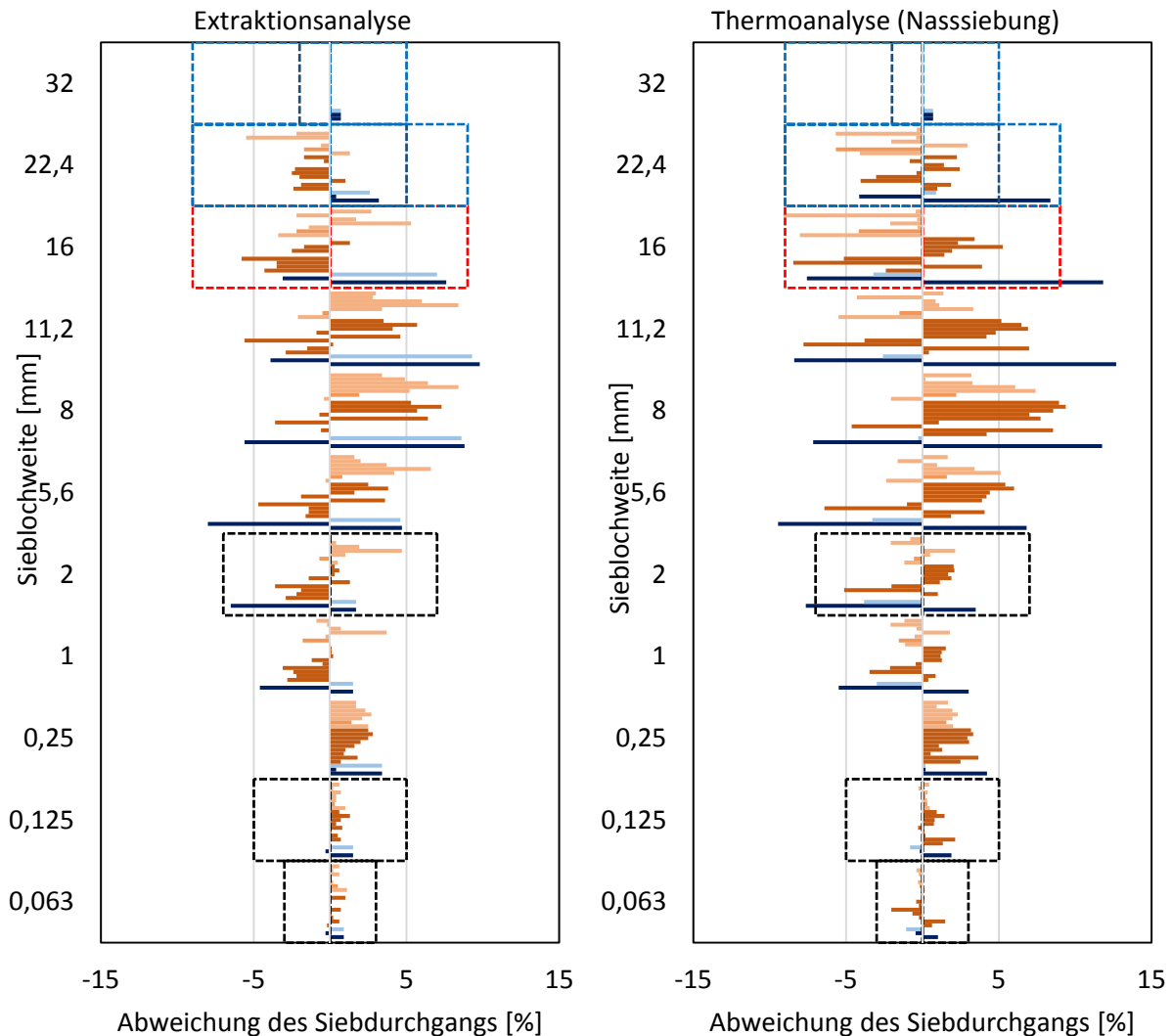
**Abbildung 62. An den WPK-Proben der Tragschichtasphalte bestimmte Bindemittelgehalte**

Die Ergebnisse der Siebanalysen sind in Abbildung 63 und 64 dargestellt. Nach Extraktionsanalysen ergeben sich keine über die WPK-Toleranzen hinausgehende Abweichungen der Mischgutzusammensetzung. Jedoch weisen die Proben teilweise bei den Siebdurchgängen zwischen 5,6 mm und 11,2 mm große Abweichungen von der nach Erstprüfung angestrebten Zusammensetzung auf. Insbesondere bei den Proben der Asphaltart AC 32 TS sind Abweichungen zu erkennen, sodass Probe AC32TS1 zu hohe Siebdurchgänge bei den Siebschnitten oberhalb von 5,6 mm aufweist, während bei Probe AC32TS2 deutlich zu geringe Siebdurchgänge aufweist. Für letztere Probe ist in den WPK-Protokollen vermerkt, dass die Probenahme aus dem Heißsilo erfolgte und dadurch möglicherweise entmischt ist.

Die anhand der Ergebnisse der Nasssiebung nach Thermoanalyse zu erkennenden Abweichungen entsprechen tendenziell jenen der extrahierten Probe. Anhand der Ergebnisse nach Thermoanalyse sind die bereits genannten Abweichungen jedoch etwas stärker ausgeprägt, sodass hier die Probe AC32TS2 beim Durchgang durch das 2-mm-Sieb die WPK-Toleranzen unterschreitet und als nicht-konform eingestuft werden würde.

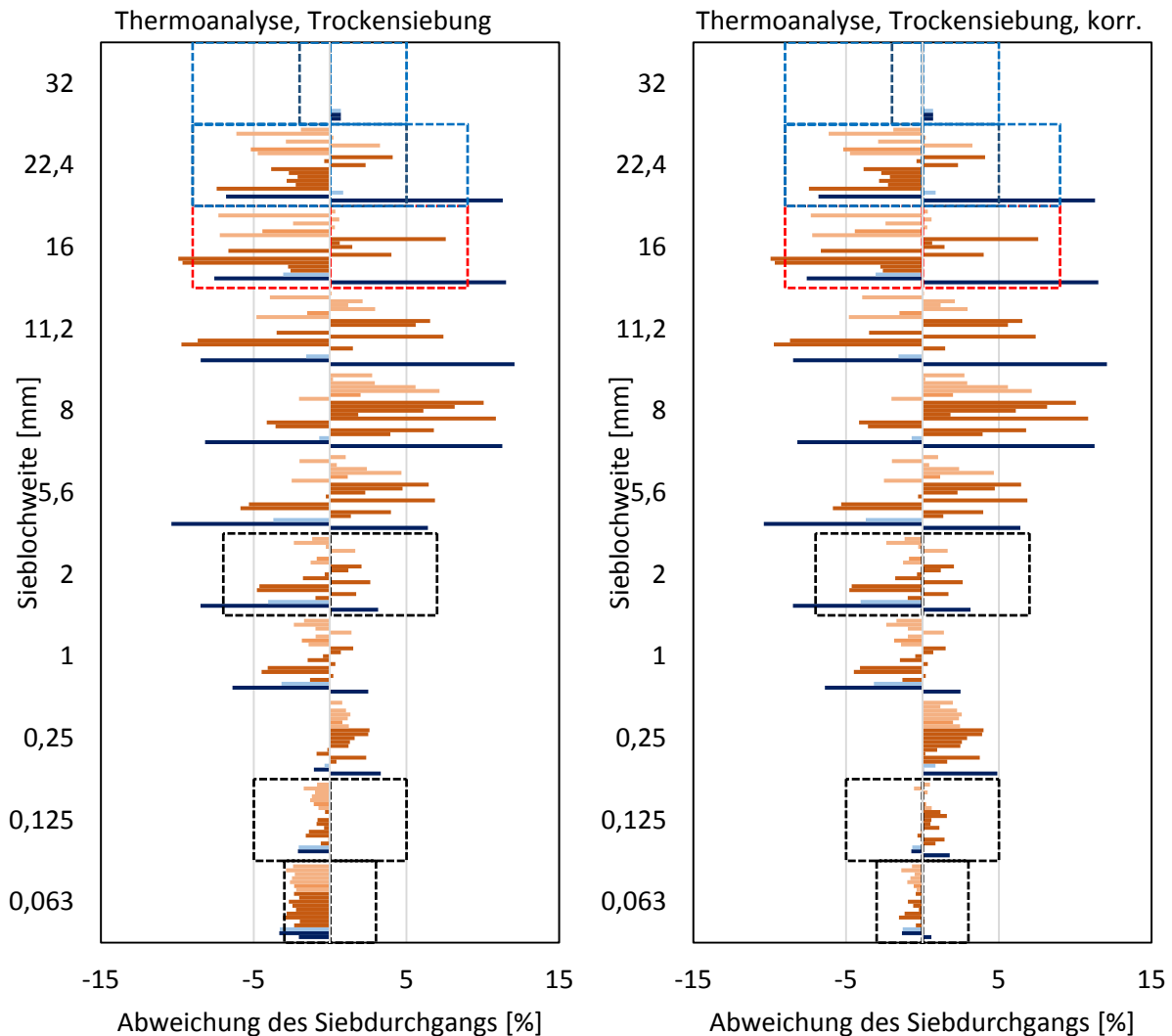
Bereits die Trockensiebung der Thermoanalyse bestätigt die vergleichsweise großen Abweichungen der Korngrößenverteilungen. Hierbei wird die Probe AC32TS2 ebenfalls aufgrund eines zu geringen Siebdurchgangs bei 2 mm als nicht-konform eingestuft. Weiterhin werden die Proben AC22TS3 und -4 aufgrund eines zu geringen Siebdurchgangs bei 16 mm als nicht-konform eingestuft. Beide Proben weisen auch in der Nasssiebung sowie nach Extraktionsanalyse größere Abweichungen auf, die jedoch innerhalb der WPK-Toleranz liegen.

Auch bei den im Rahmen der WPK untersuchten Proben des Asphalttragschicht-Mischgutes kann die bereits in der Trockensiebung ermittelte Korngrößenverteilung im Feinanteils sowie bei den Siebdurchgängen < 0,125 mm und < 0,25 mm mit den in den Laboruntersuchungen ermittelten Faktoren 1,5, 1,2 und 1,1 zielführend korrigiert werden.



**Abbildung 63. Abweichung der an den WPK-Proben bestimmten Siebdurchgängen zu den Siebdurchgängen gemäß Erstprüfung. blau: AC32, rot: AC22. links: Siebanalyse nach Extraktion, rechts: Nasssiebung nach Thermoanalyse**

Die Ergebnisse der an den Asphalttragschichtproben durchgeführten Untersuchungen an Marshall-Probekörpern sind in Abbildung 65 zusammengestellt. Hinsichtlich des Verdichtungs-  
 widerstandes weisen Proben AC22TS8 sowie AC22TN6 über die Wiederholbarkeit hinausge-  
 hende Abweichungen von den für die jeweiligen Asphaltarten bestimmten Mittelwerte auf.  
 Beide Asphaltproben weisen auch anhand der Korngrößenverteilung relevante Abweichungen  
 auf. So würde Probe AC22TN6 aufgrund der Unterschreitung beim Siebdurchgang  $\leq 16$  mm  
 in der Siebung nach Thermoanalyse als nicht-konform eingeteilt. Probe AC 22 TS 8 erfüllt die  
 WPK-Toleranzen, weist jedoch beim Siebdurchgang  $\leq 8$  mm deutlich höhere Werte auf (+9  
 %).



**Abbildung 64. Abweichung der an den WPK-Proben bestimmten Siebdurchgängen zu den Siebdurchgängen gemäß Erstprüfung. blau: AC32, rot: AC22. links: Trockensiebung nach Thermoanalyse, rechts: Trockensiebung, korrigiert**

Bei Betrachtung des am Marshall-Probekörper bestimmten Hohlraumgehaltes weisen die Proben AC32TS2 und AC32TN1 über die Wiederholbarkeit hinausgehende Abweichungen vom Wert der Erstprüfung auf. Auch diese beiden Varianten sind hinsichtlich der Korngrößenverteilung auffällig.

Anhand der Ergebnisse der Marshall-Versuche werden die Proben AC22TS-2 und -6 als auffällig identifiziert, weil deutlich höhere Stabilitäten gemessen werden. Probe AC22TS-4 weist hingegen eine geringe Stabilität auf. Anhand des Fließwertes können Proben AC22-TS-7 und -9 aufgrund von geringen Werten als auffällig eingestuft werden. Hier zeigen sich Auswirkungen der stark schwankenden Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische, welche die Unterschiede der mechanischen Eigenschaften erklären können.

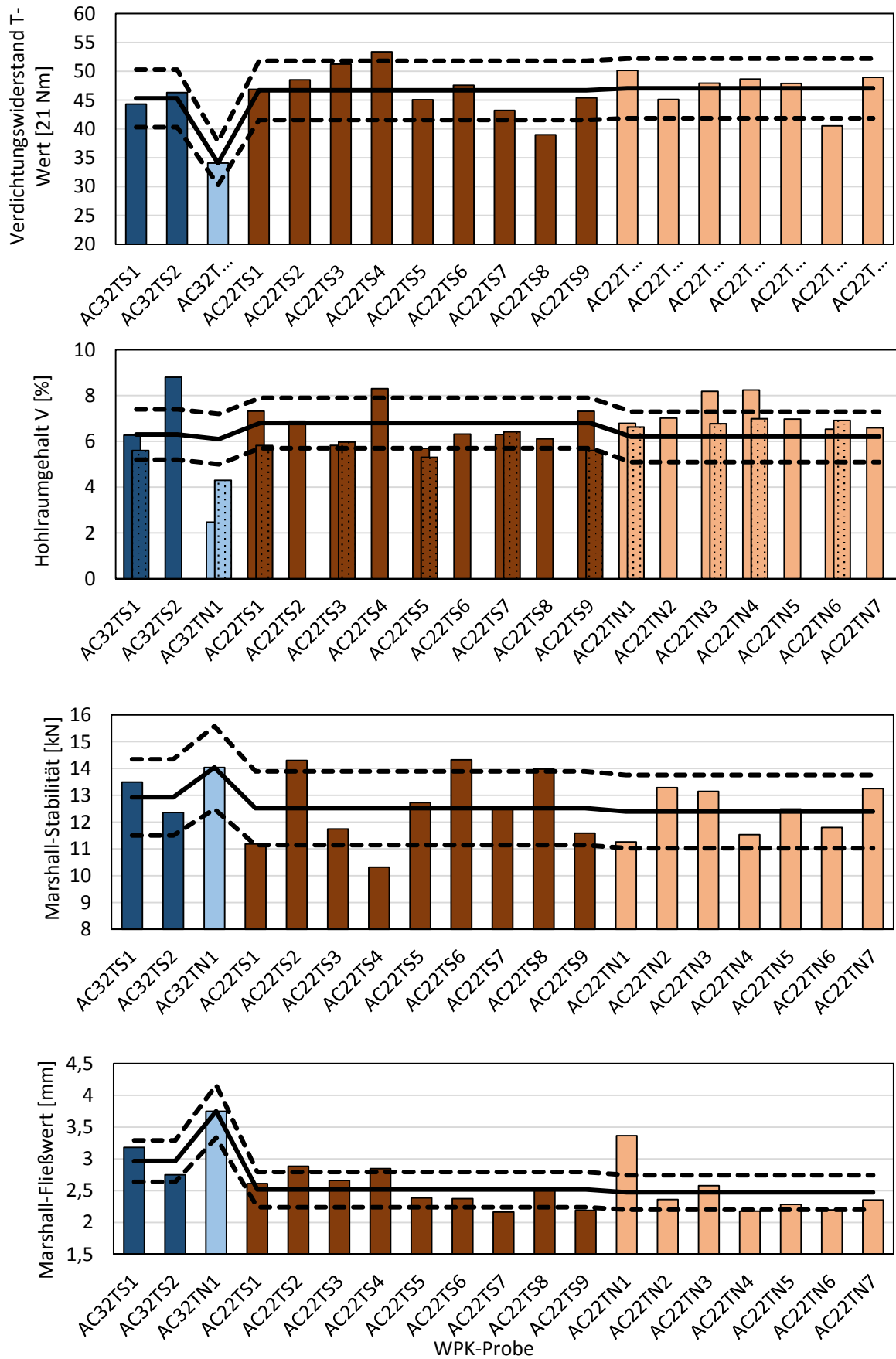


Abbildung 65. Ergebnisse der Prüfungen an Marshall-Probekörpern der Asphalttragschichtasphalte im Rahmen der lösemittelfreien WPK

## 5. Interpretation der Ergebnisse

### 5.1. Eignung der Thermoanalyse für die Überprüfung der Mischgutzusammensetzung

Anhand der Messergebnisse an im Labor hergestellten sowie der großtechnischen Produktion entnommenen Asphaltmischgut können die im Folgenden zusammengestellten Aussagen hinsichtlich der Eignung der Thermoanalyse zur Überprüfung der Asphalzzusammensetzung getroffen werden.

#### 5.1.1. Bindemittelgehalt

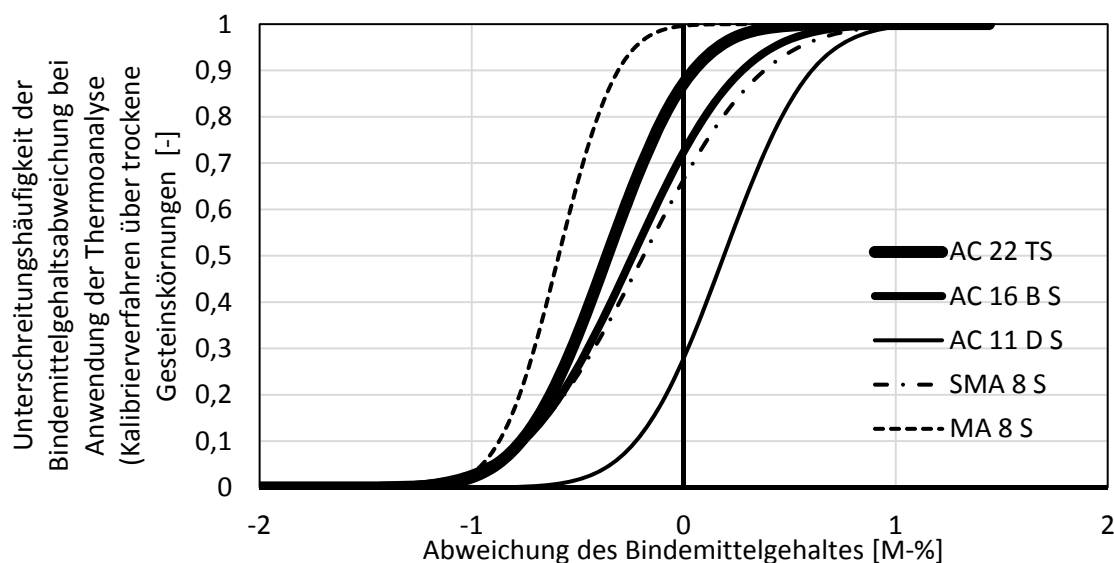
Der mittels Thermoanalyse bestimmte Bindemittelgehalt hängt ab von den angewendeten Verfahren zur Bestimmung eines Kalibrierwertes für die Berücksichtigung der Masseveränderungen des Gesteinskörnungsgemisches. Bei dem hier verwendeten Verfahren der Bestimmung des Kalibrierwertes am trockenen Gestein kommt es abgesehen von der Variante AC 11 DS bei allen Asphaltmischgutsorten zu einer Unterschätzung des Bindemittelgehaltes. Die bestimmten mittleren Abweichungen, deren Standardabweichung sowie Extremwerte sind in Tabelle 21 zusammengestellt. Aus Mittelwerten und Standardabweichung kann unter Voraussetzung einer Normalverteilung der Abweichungen bei der Bindemittelgehaltsbestimmung deren Häufigkeitsverteilungen berechnet werden. Diese sind für die fünf unter Laborbedingungen zusammengesetzten Mischgutsorten in Abbildung 66 dargestellt.

Werden unter Anwendung dieser Häufigkeitsverteilungen der Anteil der Proben berechnet, bei denen der Bindemittelgehalt nicht innerhalb der WPK-Toleranzen liegen, so ergeben sich die in der letzten Spalte der Tabelle 21 angegebenen Häufigkeiten der Unter- und Überschreitungen des Bindemittelgehaltes. Je nach Mischgutsorte ergeben sich Anteile zwischen 19 % (AC 11 DS) und 66 % (MA 8 S), welche die Anforderungen an einen konformen Bindemittelgehalt aufgrund der Prüfstreuung und systematischen Abweichung des mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes nicht erfüllen.

Ursache für diese große Abweichungen können zum einen im angewendeten Verfahren der Kalibrierwertbestimmung gesucht werden. Dabei zeigten sich große Schwankungen der an den Gesteinskörnungen bestimmten Masseverlusten, vgl. Abbildung 9. Eine weitere Ursache für die großen Anteile von Mischungen mit abweichendem Bindemittelgehalt kann in Entmischungserscheinungen liegen. So wurden zum Teil extreme Abweichungen der Korngrößenverteilung angestrebt, welche zu Mischgutvarianten mit hoher Entmischungsneigung geführt haben, z. B. der Splittmastixasphalt ohne Zugabe stabilisierender Zusätze (SMA-oFs).

**Tabelle 21: Abweichungen des mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes von der in der Mischgutvariante angestrebten (Soll-)Bindemittelgehalt (bei Mischgut mit AG: Zugabemittelgehalt)**

Asphaltsorte	Abweichung des mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes von den angestrebten Werten			Anteil der Varianten, welche die WPK-Grenzen unter- / überschreiten
	Mittelwert [M.-%]	Standardabweichung [M.-%]	maximale Abweichungen [M.-%]	
AC 22 T S	-0,35	0,317	-0,74 / +0,69	22 % / 0,2 %
AC 16 B S	-0,23	0,403	-1,01 / +0,42	18 % / 1,9 %
AC 11 S	0,20	0,324	-0,41 / +0,51	1,6 % / 17 %
SMA 8 S	-0,18	0,445	-1,07 / +0,71	24 % / 6,1 %
MA 8 S	-0,58	0,219	-1,13 / -0,24	66 % / 0,0 %



**Abbildung 66. Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Abweichung des mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes vom tatsächlichen Bindemittelgehalt des geprüften Mischgutes**

Da im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen unter Laborbedingungen zusammengesetzte Asphaltmischgutvarianten untersucht wurden, besteht die Möglichkeit, das Verfahren A2 zur Ermittlung der Kalibrierwerte anzuwenden. Dabei wird der Kalibrierwert aus der Differenz des Masseverlustes der Thermoanalyse und dem tatsächlichen Bindemittelgehalt der Probe bestimmt. Für die Asphaltbindervarianten mit einem Bindemittelgehalt von 4,5 % konnte somit ein mittlerer Kalibrierfaktor von  $C_{F,A2} = 1,30$  ermittelt werden. Die Schwankungen der resultierenden Bindemittelgehalte bleiben dabei in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Anwendung des an den trockenen Gesteinskörnungen ermittelten Kalibrierwertes, jedoch führt das Verfahren dazu, dass die Abweichungen gleichmäßig auf Werte unter und über dem Soll-Bindemittelgehalt liegen. Die für die untersuchten Asphaltvarianten ermittelten Abweichungen des Bindemittelgehaltes bei Anwendung des Kalibrierwertes  $C_{F,A2}$  sind in Tabelle 22 zusammengestellt. Demnach beträgt der Anteil an Proben mit nicht-konformen Bindemittelgehalten 10 % bei AC22TS, 13,7 % bei AC16BS, 14,4 % bei AC11DS, 18,5 % bei SMA8S und 2,7 % bei den Gussasphaltvarianten.

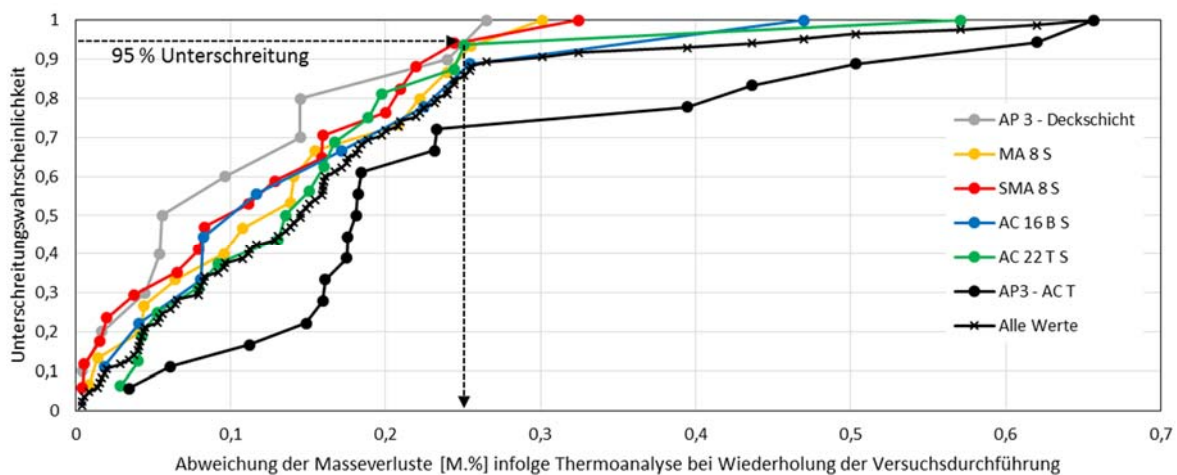
**Tabelle 22: Abweichungen des mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes von der in der Mischgutvariante angestrebten (Soll-)Bindemittelgehaltes (bei Mischgut mit AG: Zugabebindemittelgehalt) unter Verwendung des am trockenen Gestein ermittelten Kalibrierwertes**

Asphaltsorte	Kalibrierwert (Verfahren A.2) $C_{F,A2}$ [M.-%]	Abweichung des mittels Thermoanalyse bestimmten Bindemittelgehaltes von den angestrebten Werten		Anteil der Varianten, welche die WPK-Grenzen unter- / überschreiten
		Standardabweichung [M.-%]	maximale Abweichungen [M.-%]	
AC 22 T S	1,07	0,365	-0,53 / 1,02	5,3 % / 4,7 %
AC 16 B S	1,30	0,403	-0,78 / +0,54	7,2 % / 6,5 %
AC 11 S	1,67	0,341	-0,62 / 0,38	7,6 % / 6,8 %
SMA 8 S	1,06	0,377	-1,15 / +0,81	9,7 % / 8,8 %
MA 8 S	0,37	0,225	-0,58 / 0,34	1,5 % / 1,2 %



So, wie die Kalibrierwertbestimmung das Ergebnis der Bindemittelgehaltsbestimmung beeinflusst, hängt auch die Prüfpräzision vom angewendeten Verfahren der Kalibrierwertbestimmung ab. Für eine grobe Einschätzung der Prüfpräzision wurden insgesamt 85 Thermoanalysen an Asphaltmischgutproben doppeltbestimmt durchgeführt. Die dabei beobachteten Abweichungen zwischen den beiden bestimmten Masseverlusten, die Grundlage für die Bindemittelgehaltsbestimmung sind, sind in Abbildung 67 in Form von Summenlinien der Unterschreitungswahrscheinlichkeit aufgetragen. Abgesehen von den im Asphaltmischwerk beprobten Asphalttragschichtvarianten ergeben sich vergleichbare Verteilungen der bestimmten Abweichungen. Die Ausreißerprüfung gemäß dem FGSV-Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2 ergab für keine der untersuchten Asphalte oder für die Gesamtzahl der Werte ausreißerverdächtige Ergebnisse.

Eine Abweichung von 0,25 M.-% wird bei den vergleichbaren fünf Asphaltmischgutvarianten bei 95 % der untersuchten Mischgutproben unterschritten. Somit können die Präzisionsangaben der DIN EN 12697-39 (vgl. Tabelle 2), welche Wiederholpräzisionen zwischen 0,17 % und 0,37 % benennt, als realistisch angesehen werden.



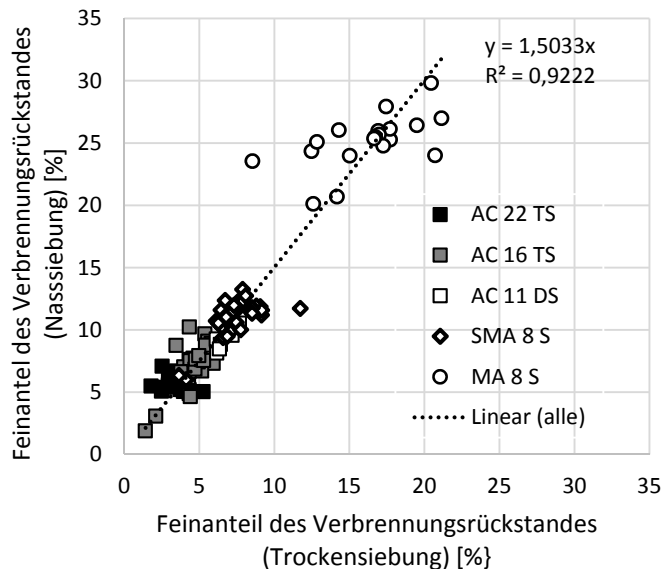
**Abbildung 67. Histogramme der Abweichungen der Masseverluste bei Thermoanalysen an Asphaltmischgutproben zur Abschätzung der Präzision**

### 5.1.2. Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstandes

Mittels Trockensiebung kann die Korngrößenverteilung des Verbrennungsrückstand der Asphaltprobe nach Abkühlung bestimmt werden. Infolge der thermischen Beanspruchungen kommt es zu Agglomeration insbesondere der Feinanteile, sodass bei der Trockensiebung eine Unterschätzung des Feinanteils (< 0,063 mm) und der feinen Gesteinskörnungen (0,063 mm bis 2 mm) nicht auszuschließen ist.

In Abbildung 68 sind die mittels Nasssiebung bestimmten Feinanteile jenen der Trockensiebung gegenübergestellt. Über allen untersuchten Asphaltvarianten ist ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Feinanteilen zu erkennen. Wird in der Trockensiebung ein bestimmter Feinanteil ermittelt, so ist der nach Nasssiebung bestimmte Feinanteil rund 50 % höher. Dieser Zusammenhang kann verwendet werden, um den Wert für den Feinanteil bereits aus der Trockensiebung zu erlangen. Entsprechend sind die mittels Nasssiebung bestimmten Siebdurchgänge < 0,125 mm um rund 20 % und jene < 0,25 mm um rund 10 % höher als die mittels Trockensiebung bestimmten.

In Tabelle 23 ist die Anzahl der je Asphaltart anhand des korrigierten Feinanteils nach Trockensiebung als konform bzw. nicht konform eingeteilten Gesteinsmischungen ergänzt. Auch mittels Trockensiebung wird nach erfolgter Korrektur des Feinanteils eine Quote von 75 % bei den konformen und von 78 % bei den nicht-konformen Asphaltzusammensetzungen erreicht. Durch die Korrektur des Feinanteils kann bereits in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum eine gute Identifizierung von Fehlern der Asphaltzusammensetzung auch im Feinanteil erreicht werden.



**Abbildung 68. Zusammenhang zwischen den mittels Trockensiebung und Nasssiebung ermittelten Feinanteils der untersuchten Asphalt-Varianten**

**Tabelle 23: Quote der erfolgreich als konform bzw. nicht-konform identifizierten im Labor hergestellten Asphaltproben**

Asphaltvariante		Anzahl der Varianten	Anzahl der entsprechend der angestrebten Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches als konform/nicht-konform eingeteilten Asphaltproben und Erfolgsquote		
			Trockensiebung	Nasssiebung	Trocken (korr.)
AC 22 T S	konform	22	16 (73 %)	16 (73 %)	17 (77 %)
	nicht-konform	4	3 (75 %)	3 (75 %)	3 (75 %)
AC 16 B S	konform	29	28 (97 %)	28 (97 %)	28 (97 %)
	nicht-konform	7	5 (71 %)	6 (86 %)	4 (57 %)
AC 11 D S	konform	3	3 (100 %)	3 (100 %)	0 (0 %)
	nicht-konform	3	2 (67 %)	3 (100 %)	3 (100 %)
SMA 8 S	konform	34	1 (3 %)	26 (76 %)	25 (74 %)
	nicht-konform	2	2 (100 %)	1 (50 %)	1 (50 %)
MA 8 S	konform	17	0 (0 %)	15 (88 %)	9 (53 %)
	nicht-konform	2	2 (100 %)	2 (100 %)	2 (100 %)
<b>Gesamt</b>	<b>konform</b>	<b>105</b>	<b>48 (46 %)</b>	<b>88 (84 %)</b>	<b>79 (75 %)</b>
	<b>nicht-konform</b>	<b>18</b>	<b>14 (78 %)</b>	<b>15 (83 %)</b>	<b>14 (78 %)</b>

### **5.1.3. Identifikation abweichender Asphaltvarianten anhand der mechanischen Eigenschaften**

Wie die Ergebnisse der Asphaltuntersuchungen insbesondere an den im Labor hergestellten Asphaltvarianten gezeigt haben, haben die angewendeten Änderungen der Asphalteigenschaften unterschiedlich stark ausgeprägte Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften. Außer bei Verdichtungswiderstand und Hohlraumgehalt beeinflusst der Arbeitsschritt der Verdichtung und die dabei erzielten volumetrischen Kennwerte zusätzlich die Ergebnisse des Marshall-Versuchs sowie des Spaltzugversuchs. In Tabelle 24 sind die mechanischen Eigenschaften markiert, welche durch die veränderten Asphalteigenschaften beeinflusst werden. Ist die beobachtete Veränderung plausibel jedoch innerhalb der Wiederholpräzision des jeweiligen Prüfverfahrens, so ist die entsprechende Kombination mit einem „o“ markiert und hellgrün eingefärbt. Veränderungen, die über die Wiederholbarkeit hinausgehen sind mit einem „x“ sowie dunkelgrün gekennzeichnet. Ist kein Einfluss feststellbar bzw. widerspricht die beobachtete Veränderung den bekannten asphalttechnologischen Grundlagen, so sind die Kombinationen rot eingefärbt und mit „-“ markiert. Nicht betrachtete Kombinationen sind grau eingefärbt.

Die Zusammensetzung (Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung) beeinflusst den Verdichtungswiderstand und den im Marshallprobekörper erreichten Hohlraumgehalt. Hierbei kommen Verdichtungswiderstand und Hohlraumgehalt zu guter Übereinstimmung der identifizierbaren Änderungen der Asphalteigenschaften. So könnte auf den Verdichtungswiderstand verzichtet werden, wenn eine längere Zeitdauer bis zum Vorliegen der Ergebnisse des Hohlraumgehaltes in Kauf genommen werden können.

Asphaltvarianten mit Änderungen der Bindemittleigenschaften (Variation der eingesetzten Bitumenart und -sorte und der Einsatz von Modifikationen (z. B. viskositätsverändernde Zusätze, Gummigranulat, Kalkhydrat) oder durch verfahrenstechnische Variationen (verlängerte Misch- oder Lagerzeit) können allerdings nicht mittels Verdichtungswiderstand oder Hohlraumgehalt identifiziert werden. Hier reagieren jedoch die Parameter Marshallstabilität, Fließwert sowie Spaltzugfestigkeit auf die Veränderungen. Hierbei wird auch deutlich, dass die Betrachtung des Marshall-Fließwertes in Ergänzung zur Stabilität ein wichtiger Indikator für variierte Bindemittleigenschaften ist. Die Spaltzugfestigkeit zeigt bei den hier vorliegenden Untersuchungen gegenüber der Marshall-Stabilität keine ergänzende Aussagekraft, sodass - auch aufgrund der erst am Folgetag der Probekörperherstellung möglichen Versuchsdurchführung - auf den Einsatz im Rahmen der WPK verzichtet werden kann. Insbesondere die ergänzend untersuchten Parameter Horizontalverformung und Verformungsarbeit weisen eine geringe Versuchspräzision auf, sodass diese nicht weiter betrachtet werden müssen.

Die Zugabe von Asphaltgranulat und insbesondere dabei vorkommender Abweichungen können gut mittels Verdichtungswiderstand, Hohlraumgehalt und Marshallversuch identifiziert werden.

**Tabelle 24: Identifizierbarkeit verschiedener Abweichungen der Asphalteeigenschaften mit den unterschiedlichen mechanischen Prüfverfahren**

Prüfverfahren / Eigenschaft	Relative Abweichung																														
	Verdichtungswiderstand T-Wert				Hohlraumgehalt V				Marshall-Stabilität				Marshall-Fließwert				Spaltzugfestigkeit				Horizontale Verformung				Verformungsarbeit				Stempeleindringtiefe		
Geänderte Asphalteeigenschaft	AC 22 TS	AC 16 BS	AC 11 DS	SMA 8 S	AC 22 TS	AC 16 BS	AC 11 DS	SMA 8 S	AC 22 TS	AC 16 BS	AC 11 DS	SMA 8 S	AC 22 TS	AC 16 BS	AC 11 DS	SMA 8 S	AC 22 TS	AC 16 BS	AC 11 DS	SMA 8 S	AC 22 TS	AC 16 BS	AC 11 DS	SMA 8 S	AC 22 TS	AC 16 BS	AC 11 DS	SMA 8 S	MA 8 S		
Bindemittelgehalt	-	-	x	x	o	o	o	x	o	o	o	x	-	-	o	o	-	-	o	o	-	-	o	o	-	-	o	x			
Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches	-	o	o	x	o	o	o	x	o	o	-	o	-	o	o	x	o	x	o	o	-	o	-	-	o	o	-	o	o		
Gesteins- bzw. Füllertart	/	/	/	/	x	/	/	o	-	/	/	o	o	/	/	o	-	/	/	o	-	/	/	-	-	/	/	-	x		
Bindemittelviskosität	/	-	/	o	-	-	/	o	x	x	/	o	-	o	/	x	-	o	/	x	-	o	/	o	-	o	/	o	x		
Modifikation (z. B. viskositäts-verändernder Zusatz, Gummigranulat)	/	o	/	/	/	-	/	-	/	o	/	o	/	-	/	o	/	-	/	o	-	o	/	o	/	-	/	o	-		
Herstellungsparameter	/	/	/	-	/	/	/	o	/	/	/	-	/	/	/	o	/	/	/	o	-	/	/	o	/	/	/	o	x		
Einsatz von Asphaltgranulat	o	o	/	/	x	o	/	/	x	x	/	/	x	-	/	/	o	x	/	/	-	-	/	/	-	o	/	/	/		
Abweichendes Asphaltgranulat	/	x	/	/	/	o	/	/	/	x	/	/	/	x	/	/	/	o	/	/	-	-	/	/	/	-	/	/	/		

Legende:  
■ Asphalteeigenschaft wird klar identifiziert; Veränderung führt zu Abweichungen, die über die Wiederholbarkeit hinausgehen  
■ Tendenzen hinsichtlich des Einflusses der Veränderung sind erkennbar und plausibel  
■ kein Einfluss feststellbar  
■ Asphalteeigenschaft wurde nicht untersucht

## 6. Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammengestellt.

### 6.1. Bestimmung des Bindemittelgehaltes mittels Thermoanalyse

- Die thermischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen haben einen hohen Einfluss auf die Ergebnisse der Bindemittelgehaltsbestimmung und erfordern die Bestimmung eines individuellen Kalibrierwertes für jede Asphaltzusammensetzung.
- Die Ermittlung des Kalibrierwertes an dem trockenen Gesteinskörnungsgemisches ist nicht zielführend, da während der Verbrennung von Asphaltmischgut infolge der Entflammung des Bitumens andere thermische Beanspruchungen auftreten als die gesteuerte thermische Beanspruchung bei Prüfung der trockenen Gesteinskörnungen.
- Der an Asphalt bzw. Gesteinskörnungen bestimmte Masseverlust ist mit vergleichsweise hohen Prüfunsicherheiten verbunden. Wird ein am Gestein ermittelter Kalibrierwert verwendet, sinkt die Prüfpräzision der Bindemittelgehaltsbestimmung.
- Das gleiche gilt für die Kalibrierung an mittels Extraktionsanalyse bestimmtem Bindemittelgehalt. Hier erhöht die Streuung der Bindemittelgehaltsbestimmung sowie die erforderliche Probeteilung die Unsicherheit des Verfahrens.
- Der im Rahmen einer WPK verwendete Kalibrierwert kann als gleitender Mittelwert aus den zuvor geprüften Asphaltproben bestimmt werden. Zunächst wird der Start-Kalibrierwert anhand einer im Rahmen der Erstprüfung oder einer zusätzlichen im Labor mit repräsentativen Gesteinsproben hergestellten Asphaltprobe bestimmt. Die Differenz aus dem in der Thermoanalyse bestimmten Masseverlust und dem eingesetzten Bindemittelgehalt ergibt den Kalibrierwert (Verfahren A.2 gemäß DIN EN 12697), welcher bei der ersten WPK-Probe eingesetzt wird. Für jede weitere WPK-Probe wird der Mittelwert aus den an zuvor untersuchten Proben bestimmten Differenzen aus Masseverlust und Soll-Bindemittelgehalt gebildet und als Kalibrierwert verwendet. Nicht-konforme Proben, welche abweichende Bindemittelgehalte aufweisen, werden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.
- Das vorgenannte Verfahren eignet sich auch für Asphaltmischgut mit Zusatz von Asphaltgranulat.
- Die Größenordnung der in DIN EN 12697-39 angegebenen Werte der Wiederholpräzision können durch im Rahmen des Projektes doppeltbestimmt durchgeführte Thermoanalysen bestätigt werden.

### 6.2. Bestimmung der Korngrößenverteilung am Verbrennungsrückstand nach der Thermoanalyse

- Abgesehen von einer Asphalttragschichtprobe mit Kalkstein zeigten sich die hier untersuchten Gesteinsarten hinsichtlich der thermischen Beanspruchungen infolge Thermoanalyse als stabil, sodass keine Kornverfeinerung beobachtet werden konnte. Bei empfindlichen Gesteinskörnungen muss die mögliche Kornverfeinerung jedoch berücksichtigt werden.
- Infolge der thermischen Beanspruchung kommt es zur Agglomerationen des Feinanteils sowie der feinen Gesteinskörnungen, die nicht durch die Trockensiebung aufgelöst werden können.

- Mittels Nasssiebung können die Agglomerate gelöst werden, sodass die Korngrößenverteilung am Verbrennungsrückstand zur Überprüfung der Asphaltzusammensetzung angewendet werden kann.
- Der Unterschied zwischen den Siebdurchgängen der Trocken- und Nasssiebung kann mit einem einfachen Faktor beschrieben werden (Siebdurchgang (nass) =  $X \cdot$  Siebdurchgang (Trockensiebung)). Für die hier untersuchten Gesteinskörnungen sowie den verwendeten Thermoofen und Siebmaschinen können die mittels Nasssiebung bestimmten Siebdurchgänge aus jenen der Trockensiebung mit folgenden Faktoren  $X$  angenähert werden:
  - Feinanteil (< 0,063 mm):  $X_{0,063} = 1,5$
  - < 0,125 mm:  $X_{0,125} = 1,2$
  - < 0,25 mm:  $X_{0,25} = 1,1$
- Die Validierung des Verfahrens an werksgemischten WPK-Proben hat gleiche Tendenzen der mittels Thermoanalyse bestimmten Gesteinskörnungs-Zusammensetzung gezeigt wie die mittels Extraktionsanalyse bestimmten. Allerdings waren die nach Thermoanalyse bestimmten Abweichungen etwas ausgeprägter, sodass bei einigen Proben die WPK-Toleranzen überschritten wurden.

#### **6.2.1. Bestimmung der Eigenschaften am Marshall-Probekörper als Hinweis zu mechanischen Asphalteeigenschaften**

- Im Projekt wurden die Asphalteeigenschaften Verdichtungswiderstand, Hohlraumgehalt der MPK, Marshall-Stabilität und Fließwert sowie Spaltzugfestigkeit analysiert. Im Rahmen von im Labor vorgenommener Mischgutvariationen konnte die Eignung der genannten Eigenschaften für die Kontrolle der Asphalte im Rahmen der WPK - auch als Ersatz für Analysen an rückgewonnenen Bindemitteln überprüft werden.
- Der Verdichtungswiderstand wird maßgeblich durch die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches beeinflusst.
- Der Hohlraumgehalt des Marshall-Probekörpers, verdichtet mit 2 x 50 Schlägen, reagiert sehr sensibel auf Veränderungen der Asphaltzusammensetzung, insbesondere Bindemittelgehalt, Gesteinskörnungsgemisch und Variationen des Asphaltgranulates.
- Die in Marshall-Versuchen ermittelten Ergebnisse Stabilität und Fließwert können gut zur Identifikation von veränderten Bindemiteleigenschaften sowie mechanisch wirksamen Mischguteigenschaften (z. B. Füllerart) sowie variiertes Asphaltgranulatzugaben herangezogen werden.
- Die Spaltzugfestigkeit differenziert ebenfalls hinsichtlich Bindemiteleigenschaften. Jedoch werden weitgehend die gleichen Proben als auffällig identifiziert wie mittels Marshall-Versuch.
- Weitere untersuchte Ergebnisse des Spaltzugversuch (horizontale Verformung und Verformungsarbeit) haben insbesondere aufgrund geringer Prüfpräzision keine ergänzenden Hinweise auf auffällige Proben erbracht.
- Im Rahmen der Überprüfung von werksgemischten Proben konnten insbesondere anhand des Hohlraumgehaltes sowie der Ergebnisse des Marshall-Versuchs auffällige Proben identifiziert werden. Bei nicht allen konnte die Auffälligkeit einer tatsächlich angestrebten Abweichung der Asphaltzusammensetzung zugeordnet werden.
- Die Sensibilität der durchgeführten Asphaltprüfungen auf Mischgutvariationen, welche im Rahmen der WPK-Toleranzen vorgenommen wurden, weist auf einen möglichen

Einsatz zur vereinfachten Überprüfung von Performance-Anforderungen hin. Zur weiteren Überprüfung von Zusammenhängen sind vergleichende Untersuchungen mit einfachen und am Gebrauchsverhalten orientierten Prüfverfahren erforderlich.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass der Einsatz der lösemittelfreien Prüfverfahren als Alternative im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle möglich ist. Dazu ist eine Überprüfung der hier genannten Verfahren insbesondere hinsichtlich der Ermittlung geeigneter Kalibrierwerte für die Bindemittelgehaltsbestimmung erforderlich. Desweiteren ist eine Anpassung der WPK-Grenzen an die neuen Prüfverfahren zu überdenken. Dazu sollte die zunächst verbleibende Verwendungsmöglichkeit von Trichlorethylen bis 2023 genutzt werden, um mittels parallel angewendeter Prüfverfahren einen gleitenden Übergang zu den Alternativverfahren zu ermöglichen.

## 7. Zusammenfassung

Grundlage für die Sicherung der angestrebten Qualität von Asphaltmischgut ist neben der anforderungsgerechten Erstprüfung und Konzeption des Baustoffes auch die laufende Überprüfung des Produktionsprozesses. Dabei spielt die regelmäßige Kontrolle der Qualität des großtechnisch hergestellten Asphaltmischgutes eine wichtige Rolle. Im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) überprüfen die Asphalthersteller, ob die Zusammensetzung des hergestellten Asphaltmischgutes den in der Erstprüfung definierten Eigenschaften entsprechen. Für die Bestimmung der Asphaltzusammensetzung kommt dabei die Extraktionsanalyse zur Anwendung, welche fast ausschließlich mittels Extraktionsautomaten unter Verwendung des Lösemittels Trichlorethylen erfolgt. Aufgrund seiner Karzinogenität ist eine Verwendung nur unter hohen Auflagen der Arbeitssicherheit und vorerst nur bis 2023 formal zulässig.

Als alternative Verfahrensweise wurden im Forschungsvorhaben 18942 N im Programm der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) an der Universität Kassel, Sachgebiet Bau und Erhaltung von Verkehrswegen Laborprüfungen ohne Lösemittelleinsatz auf die Einsetzbarkeit im Rahmen einer lösemittelfreien WPK hin geprüft.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes haben gezeigt, dass der Einsatz lösemittelfreier Prüfverfahren für die Qualitätsüberprüfung von Asphaltmischgut grundsätzlich geeignet ist. Mittels Thermoanalyse kann der Bindemittelgehalt bestimmt werden. Zur Berücksichtigung der individuellen Gesteinseigenschaften ist jedoch eine Kalibrierung erforderlich. Für die Vorgehensweise im Rahmen der WPK wurde ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem der Kalibrierwert mit vergleichsweise geringem Prüfaufwand auch bei Verwendung von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat abgeschätzt werden kann.

Die Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches im Asphaltmischgut kann mit guter Präzision durch Nasssiebung des Verbrennungsrückstandes bestimmt werden. Um schnellere Ergebnisse zu erzielen ist ebenfalls eine Trockensiebung geeignet, bei der jedoch die Siebdurchgänge  $< 0,25$  mm,  $< 0,125$  mm und  $< 0,063$  mm korrigiert werden müssen. Hierbei zeigten sich für das verwendete Gestein einheitliche Kalibrierwerte, sodass bereits die Trockensiebung für die WPK herangezogen werden kann.

Somit stehen die für die Überprüfung der Asphaltzusammensetzung relevanten Ergebnisse (Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung) in einem ähnlichen Zeitraum zur Verfügung, wie bei der herkömmliche Extraktionsanalyse.

Der Einsatz mechanischer Prüfungen als Alternative zu den Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels war ebenfalls Erfolg versprechend. So können die Auswirkungen von Abweichenden Zusammensetzungen sowie variierten Ausgangsbaustoffen durch Abweichungen der Kennwerte von Hohlraumgehalt, Verdichtungswiderstand und/oder Marshall-Stabilität und Fließwert identifiziert werden. Die Art der Abweichung ist nicht genau zu differenzieren. Jedoch können auffällige Mischgutproben bestimmt werden, welche einer weiteren Untersuchung unterzogen werden können.

Um eine weiterführende Validierung der Ergebnisse zu ermöglichen, wird angeregt, eine Technische Prüfvorschrift für die Thermoanalyse zu erstellen und die Verfahren an weiteren Standorten insbesondere für weitere Gesteinskörnungen zu erproben. Im entsprechenden Arbeitskreis der FGSV wird ein Arbeitspapier für die lösemittelfreie WPK auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse erstellt.



## 8. Literatur

Arand, W & Renken, P. Grundlegende Untersuchungen über den Einfluss der Zusammensetzung auf die Verdichtbarkeit von Walzasphalten mittels Variation kompositioneller Merkmale zur Schaffung quantitativer Bewertungsmaßstäbe. Schlussbericht zum Forschungsauftrag 8167 der AiF. Braunschweig 1992.

BmVBS-Forschungsprojekt Nr. FE 07.0272/2013/ARB. Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Kokosester. Forschungsprojekt der TU Braunschweig. <https://www.tu-braunschweig.de/isbs/forschung/laufendeforschungsprojekte/kokosester> (abgerufen am 23. Juli 2014)

Brown, E.R., Murphy, N.E., Yu, L. & Mager, S. Historical Development of Asphalt Content Determination by the ignition method. AAPT 1995.

Deutsches Asphalt Institut. Forschungsziele fokussiert. Aufstellung von Themen mit aktueller Forschungspriorität. [http://www.asphalt.de/site/startseite/deutsches\\_asphaltinstitut/forschungsziele/](http://www.asphalt.de/site/startseite/deutsches_asphaltinstitut/forschungsziele/) (abgerufen am 23. Juli 2014)

DIN EN 12697. Prüfung von Asphalt.

Drüschner, L. Erfahrungen mit der Thermoanalyse zur Bindemittelgehaltsbestimmung von Asphalten. Bitumen 4/93. S. 158-162.

Guretzki, M. & Kleinschmit, T. Lösemittelfreies Verfahren für die Qualitätssicherung von Asphalt. Masterprojekt. Universität Kassel, SG Bau und Erhaltung von Verkehrswegen. 2013.

Jengsen, M., Kargo, A. & Nielsen, E. Environmental improvement of binder content and aggregate gradation determination. NVF 33 Meeting held on 17<sup>th</sup> June 2002 in Finland. 2002

Hahn, T. & Schneider, U. Bestimmung des Bindemittelgehaltes von Asphalten durch thermische Analyse. Bitumen 1/91. S. 16-39.

Hutschenreuther, J & Müller, A. Untersuchungen zum Einsatz der Schallimpulszerkleinerung zum lösemittelfreien Aufschluss von Asphalt. Abschlussbericht zu DBU Az 22173. Weimar 2007.

Kowalski, K.J., McDaniel, R.S., Olek, J & Shah, A. 2010. Determining of the Binder Content of Hot Mix Asphalt Containing Dolomitic Aggregates Using the Ignition Oven. FHWA/IN/JTRP-2010/13

Leutner, R., Renken, P. & Lobach, T. Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 908. 2005.

Renken, P. Verdichtung von Walzasphalt im Laboratorium und im Felde. Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen der TU Braunschweig. Heft 18. 2002.

Roßberg, K. & Bader, E. Der Einfluss von Umwandlungsvorgängen in Mineralstoffen auf das Ergebnis der Thermoanalyse von Asphalten. Straße und Autobahn 5/1997.

Sholar, G.A., Musselman, J.A., Page, G.C., Upshaw, P.B. & Moseley, H.L. Precision statements for the ignition oven using plant-produced mix. Research Report FL/DOT/SMO/01-445. 2001.

Täube, A. Welches Lösemittel verwenden wir zukünftig bei der Asphaltextraktion? Straße und Autobahn 11/2013.

Weingart, W. & Krüger, K. Entwicklung eines Verfahrens zur Bindemittelrückgewinnung nach Asphaltextraktion mit alternativen Lösemitteln aus nachwachsenden Rohstoffen. AiF-Forschungsprojekt Nr. 16287 BR. Dessau-Roßlau 2012.