

Schlussbericht

Auswirkungen unterschiedlicher Verbundsysteme auf die mechanischen Eigenschaften eines mehrschichtigen Asphaltpaketes

Antragsteller:	Deutsches Asphaltinstitut e.V. - DAI Schieffelingsweg 6 53123 Bonn
Forschungsnehmer:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner Technische Universität Braunschweig Institut für Straßenwesen Pockelsstr. 3, 38106 Braunschweig
Projektleiter:	PD Dr.-Ing. habil. Peter Renken
Sachbearbeiter:	Dipl.-Ing. Thomas Lobach

Auswirkungen unterschiedlicher Verbundsysteme auf die mechanischen Eigenschaften eines mehrschichtigen Asphaltpaketes

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0 Kurzfassung	
1 Aufgabenstellung	1
1.1 Begründung des Forschungsvorhabens.....	1
1.2 Ziel des Forschungsvorhabens	5
1.3 Allgemeine Angaben	6
2 Untersuchungsmethodik	7
2.1 Variationsumfang	7
2.2 Auswahl und Eigenschaften der Baustoffe.....	8
2.2.1 Asphaltbinder 0/16 S.....	9
2.2.2 Asphaltbeton 0/11 S.....	11
2.2.3 Splittmastixasphalt 0/8 S.....	13
2.2.4 Vorspritzmittel	15
2.2.4.1 Haftkleber.....	15
2.2.4.2 Bitumenemulsion U 60 K.....	16
2.2.4.3 Bitumenemulsion U 60 K - C2 (gemäß TL PmOB).....	16
2.3 Herstellung der Asphaltprobekörper.....	18
2.3.1 Walzsektor-Verdichtungsgerät	18
2.3.2 Verfahren der Asphalt-Temperierung.....	20
2.3.3 Herstellverfahren Heiß-auf-kalt	20
2.3.4 Herstellverfahren Heiß-auf-warm	21
2.3.5 Herstellverfahren Heiß-auf-heiß	22
2.3.6 Aufbringen des Vorspritzmittels.....	22
2.3.7 Bezeichnung der Varianten	23
2.4 Prüfverfahren.....	25
2.4.1 Prüfverfahren zur Beurteilung der Hohlraumverhältnisse.....	25
2.4.2 Prüfungen zur Beurteilung des Schichtenverbundes	25
2.4.2.1 Schichtenverbund nach Leutner	26

2.4.2.2	Haftzugfestigkeit	26
2.4.3	Prüfungen zur Beurteilung des Verformungswiderstandes	28
2.4.3.1	Spurbildungsversuch.....	29
2.4.3.2	Dynamischer Stempeleindringversuch.....	29
2.5	Festlegung einer Versuchsstrecke und Probenahme von Bohrkernen.....	31
2.6	Bewitterte Varianten	32
2.7	Mathematisch-statistische Verfahren zur Auswertung der Versuchsergebnisse.....	33
2.7.1	Einfache Varianzanalyse und Mittelwertvergleich	33
2.7.2	Multiple Varianzanalysen der 2- und 3-fachen Klassifikation	35
2.7.3	Einfache Varianzanalyse und modifizierter LSD-Test	41
3	Prüfergebnisse	44
3.1	Ergebnisse der Voruntersuchungen	44
3.1.1	Temperierverfahren.....	44
3.1.2	Verdichtungsverhalten der Asphalte im Schichtensystem.....	45
3.1.3	Optimierung der Prüfbedingungen des Spurbildungsversuchs	48
3.1.4	Einfluss der Schichtdicken auf das Verformungsverhalten	51
3.1.4.1	Einfluss der Deckschichtdicke.....	51
3.1.4.2	Einfluss der Dicke des Gesamtsystems	52
3.1.5	Optimierung der Anspritzmenge.....	54
3.1.5.1	Haftkleber.....	55
3.1.5.2	Bitumenemulsion U 60 K.....	56
3.1.5.3	Polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 (gemäß TL PmOB).....	56
3.1.6	Ergebnisse der Optimierungsversuche	57
3.2	Versuchsergebnisse zur Prüfung der Hohlraumverhältnisse.....	61
3.2.1	Hohlraumverhältnisse AB 0/11 S auf ABi 0/16 S.....	62
3.2.2	Hohlraumverhältnisse SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S.....	66
3.3	Versuchsergebnisse zur Beurteilung des Schichtenverbundes.....	70
3.3.1	Schichtenverbund nach Leutner.....	70
3.3.1.1	Unbeanspruchte Asphaltbinderoberfläche	70
3.3.1.2	Bewitterte Asphaltbinderoberfläche	74
3.3.2	Haftzugprüfung.....	76
3.3.2.1	Unbeanspruchte Asphaltbinderoberfläche	77

3.3.2.2	Bewitterte Asphaltbinderoberfläche	78
3.4	Versuchsergebnisse zur Prüfung des Verformungsverhaltens.....	79
3.4.1	Spurbildungsversuch.....	79
3.4.2	Dynamischer Stempeleindringversuch.....	81
3.5	Versuchsergebnisse der Bohrkernproben	82
4	Interpretation der Prüfergebnisse.....	86
4.1	Schichtenverbund.....	86
4.2	Verformungsverhalten	93
5	Zusammenfassung.....	97
5.1	Zusammenfassung der Prüfergebnisse und Folgerungen für die Praxis....	97
5.2	Offen gebliebene Fragen und Anregungen für weitere Forschungsarbeiten.....	102
6	Literatur.....	104

Anhang

0 Kurzfassung

Die Untersuchungen zur Überprüfung der Verbundwirkung und des Einflusses der Verbundwirkung auf das Verformungsverhalten von mehrschichtigen Asphaltpaketen wurde am Beispiel eines Asphaltbetons 0/11 S (50/70) und eines Splittmastixasphalts 0/8 S (PmB 45 A) auf Asphaltbinder 0/16 S (PmB 45 A) unter Variation der Vorspritzmittel vorgenommen. Gegenstand der Variation waren drei unterschiedliche Vorspritzmittel beim Herstellverfahren Heiß-auf-kalt – Haftkleber, U 60 K und U 60 K - C2 (gemäß TL PmOB) –, eine Nullvariante ohne Vorspritzmittel sowie weitere Herstellverfahren ohne Vorspritzmittel, nämlich Heiß-auf-warm und Heiß-auf-heiß (Kompaktasphalt). Vorab wurden für beide Deckschichtarten die Vorspritzmittelmengen hinsichtlich des Schichtenverbundes bei dreifacher Variation optimiert. Zusätzlich wurden Schichtensysteme mit einer ausgemagerten Asphaltbinderoberfläche hergestellt und geprüft, sowie Bohrkernproben aus einer Versuchsstrecke untersucht.

An den Asphaltssystemen wurde zur Beurteilung des Schichtenverbundes der Schichtenverbund nach Leutner und die Haftzugfestigkeit geprüft und zur Beurteilung des Verformungsverhaltens der Spurbildungs- und der dynamische Stempелеindringversuch durchgeführt. Für die Verdichtung der Asphaltssysteme wurde ein Walzsektor-Verdichtungsgerät eingesetzt, mit dem die Verdichtung – auch die Verdichtung der Kompaktasphaltvarianten – weitgehend realitätskonform nachgebildet werden konnte.

Anhand der Optimierungsversuche hat sich gezeigt, dass bei frischen Asphaltbinderoberflächen die Erhöhung der Vorspritzmenge den Schichtenverbund nach Leutner verringert; häufig war die Scherkraft sogar geringer als das Vergleichssystem ohne Vorspritzmittel. Lediglich die Systeme mit der polymermodifizierten Emulsion U 60 K - C2 erreichten bei allen verwendeten Vorspritzmengen gleiche oder bessere Scherkräfte.

Bei optimierter Vorspritzmenge und AB 0/11 S als Deckschicht begünstigt die U 60 K - C2 die Scherkraft sowie die Haftzugfestigkeit. Beim SMA 0/8 S als Deckschicht werden bei allen Vorspritzmitteln lediglich tendenzielle Unterschiede zur Null-

Variante ohne Vorspritzmittel gemessen, die Haftzugfestigkeit zeigt sogar ungünstigere Werte. Die Varianten Heiß-auf-warm und Heiß-auf-heiß erreichen – mit Ausnahme der Scherkraft beim AB 0/11 S – den besten Schichtenverbund. Auf bewitterten Asphaltbinderflächen begünstigen alle Vorspritzmittel den Schichtenverbund beim AB 0/11 S erheblich, beim SMA 0/8 S nur tendenziell. Die polymermodifizierte Bitumenemulsion erreicht hier in allen Fällen die günstigsten Ergebnisse. Der Haftzugversuch hat sich zur Beurteilung des Schichtenverbundes unter der Voraussetzung als gut geeignet herausgestellt, dass die Schichten ausreichend verdichtet sind – andernfalls erfolgt der Abriss innerhalb der Schicht und nicht in der Schichtgrenze.

Die Schichtensysteme mit SMA 0/8 S als Deckschichtvariante sind erwartungsgemäß in allen Fällen verformungsbeständiger als die Systeme mit AB 0/11 S. Beim AB 0/11 S als Deckschicht begünstigt die Verwendung von U 60 K - C2 tendenziell die Verformungsbeständigkeit, ebenso die Varianten Heiß-auf-warm und Heiß-auf-heiß. Beim SMA 0/8 S als Deckschicht sind die Unterschiede in der Verformungsbeständigkeit durch den Spurbildungsversuch nicht nachweisbar, mittels dynamischem Stempeleindringversuch aber als Tendenz zu erkennen.

1 Aufgabenstellung

1.1 Begründung des Forschungsvorhabens

Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt werden traditionsgemäß lagen- und schichtenweise hergestellt. Der Einbau der ersten gebundenen Asphaltsschichten erfolgt in der Regel gemäß der RStO auf ungebundenen Frostschutz- und Tragschichten. Nach Abkühlen der unteren Asphaltsschicht wird deren Oberfläche mit einem Haftkleber oder einer Bitumenemulsion angesprüht und die nächste Schicht heiß auf der kalten Unterlage eingebaut.

Mit dem Merkblatt für Schichtenverbund, Nähte, Anschlüsse und Randausbildung von Verkehrsflächen aus Asphalt (M SNAR), Ausgabe 1998, werden erstmals Richtwerte zur Verwendung der Bindemittelmengen und -art in Abhängigkeit von den zu verbindenden Schichten und der Bauklasse angegeben.

Die Schichtdicken der Deck- und Binderschichten betragen bei Befestigungen der Bauklassen III bis SV in der Deckschicht generell 4 cm und in der Binderschicht 8 cm (BK SV, I, II) bzw. 4 cm (BK III). Diese empirische Dimensionierung des Fahrbahnaufbaus berücksichtigt weder die asphaltart- und -sortenspezifischen Eigenschaften der einzelnen Schichten noch die Funktionalität des gesamten Asphaltpaketes.

Die Anforderungen an die Art und Zusammensetzung der Baustoffe sowie Grundsätze zur Herstellung der Asphaltbefestigung werden in den ZTV Asphalt – StB geregelt. Hier finden asphaltart- und -sortenspezifische Eigenschaften zwar Berücksichtigung, jedoch wird hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften des Asphaltpaketes aber lediglich das Vorhandensein eines „ausreichenden“ Schichtenverbundes gefordert. Grenz- und Anforderungswerte für die Größe des Schichtenverbundes sind in den ZTV derzeit noch nicht enthalten.

In der Praxis werden sämtliche Schichten des Fahrbahnaufbaus als Gesamtsystem belastet. Bei der Erstellung und Durchführung von Eignungsprüfungen werden dagegen alle Prüfungen – einschließlich der erweiterten Eignungsprüfungen – zur Beurteilung des Verhaltens bei Wärme und Kälte, der Verdichtbarkeit und der Ermüdung ausschließlich an den Asphaltarten /-sorten der einzelnen Schichten durchgeführt.

In neuester Zeit sind beim Einbau von Asphaltsschichten Neuerungen dahingehend zu beobachten, dass in zwei zeitlich versetzten Arbeitsgängen Heiß-auf-warm oder in einem Arbeitsgang gleichzeitig Heiß-auf-heiß (Kompaktasphalt) eingebaut und verdichtet werden.

Grätz und Suß [1] veröffentlichten 1983 zum einen theoretische Überlegungen zum Einfluss der Schichtenbindung auf die Vertikal- und Radialspannungen, zum anderen berichten sie über Untersuchungen an Bohrkernen aus Schadensbereichen einer Bundesstraße. Als Ergebnis ihrer theoretischen Überlegungen halten Grätz und Suß fest, dass die radiale Zugspannung bei „glatter“ Schichtenbindung (sozusagen kein Verbund) ungefähr den 2,7-fachen Wert der radialen Zugspannung bei „rauer“ Schichtenbindung annimmt. Der Einfluss auf die Vertikalspannung kann als untergeordnet bewertet werden. Die aus den Schubspannungen der Abscherversuche an den Bohrkernen berechneten Hauptspannungen bestätigen im Wesentlichen die theoretisch ermittelten Ergebnisse.

Im FGSV-Arbeitspapier Nr. 25/B5.1 – Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen [2] – werden qualitative Angaben zur Veränderung der Biegezugspannungen an der Unterseite einer Asphalttragschicht bei unterschiedlichen Niveaus des Schichtenverbundes zwischen der Deck-, Binder- und Tragschicht sowie zur zu erwarteten Nutzungsdauer getroffen (siehe Abbildung 1.1). Neben einem Einfluss u.a. der Temperatur auf die Dehnungen an den Schichtgrenzen wird weiter festgehalten, dass „eine Lösung des Verbundes zwischen Deckschicht und Binderschicht allein die an der Unterseite der Asphalttragschicht auftretenden Spannungen und Dehnungen schon so erhöhen kann, dass sich die rechnerische „Nutzungsdauer“ des Gesamtsystems auf ca. 30 bis 40 % des Systems mit vollem Verbund reduziert“.

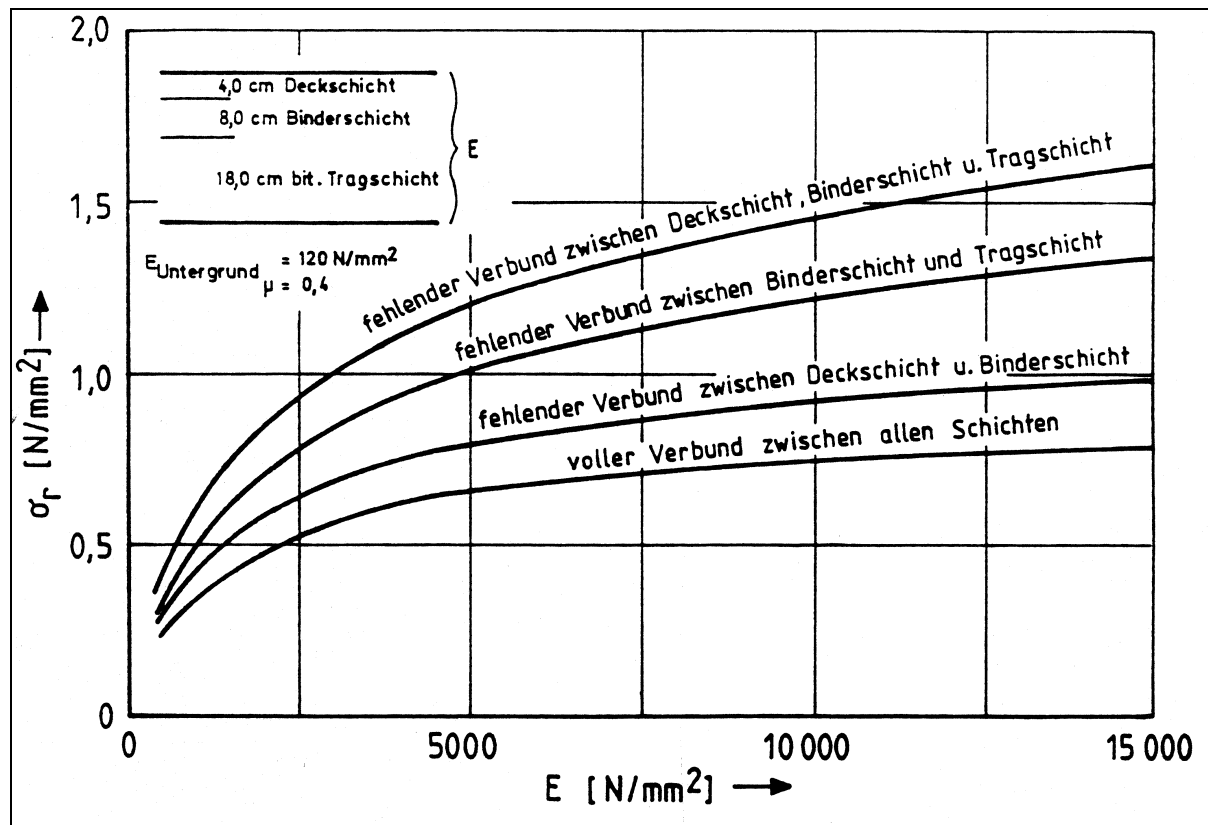


Abbildung 1.1 Veränderung der Biegezugspannungen in Abhängigkeit des Schichtenverbundes [2]

Über Berechnungen zur Nutzungsdauer berichten auch Metelmann und Beeken [7], die bereits 1979 mittels des von der Shell entwickelten BISAR-Programms Lastwechselzahlen von mehrschichtigen Asphaltbefestigungen berechneten. Als Ergebnis stellten sie fest, dass die relative Lebensdauer einer Asphaltbefestigung bei fehlendem Schichtenverbund in der oberen Schichtgrenze von 100 % auf etwa 30 % absinkt, bei zusätzlichem fehlenden Schichtenverbund in der unteren Schichtgrenze sogar auf 2 bis 7 %.

Weber [3] stellt 1991 ein Rechenverfahren basierend auf der Finiten Elemente Methode vor. Das Verfahren beruht auf der Balkenanalgie, d.h., der schichtweise vorliegende Fahrbahnaufbau wird als einteiliger Balken (voller Verbund zwischen drei Schichten) oder als dreiteiliger Balken (kein Verbund) auf zwei Stützen behandelt. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass Störungen des Schichtenverbundes Spannungumlagerungen und Spannungserhöhungen im Fahrbahnoberbau hervorrufen. Weiter treten Effekte auf, die beschleunigend auf die Lösung eines vorab vor-

handenen Verbundes hinwirken. Weber stellt weiter fest, dass bereits ab einer flächenbezogenen Verbundstörung zwischen Deck- und Binderschicht von 10 Prozent an der Unterseite der Deckschicht Biegespannungen auftreten. Er kommt letztlich zu dem Schluss, dass Verbundstörungen neben einer direkten Schädigung der Asphalt-schichten auch einen beschleunigten Ermüdungsprozess hervorrufen.

Eisenmann und Neumann [4] führten Vergleichsuntersuchungen an Asphaltprobe-körpern mit unterschiedlichen Verbundzuständen zwischen Deck- und Binderschicht durch. In Ergänzung zu den Spurrinnenversuchen wurden Abscherversuche an Bohrkernen mit dem Ziel einer Quantifizierung des Schichtenverbundes durchgeführt. Der Aufbau der Bohrkern entsprach der RStO 86/89, Tafel 1, Zeile 1, Bauklasse III. Der Asphaltbinder wurde auf der Asphalttragschicht Heiß-auf-warm eingebaut, und die Oberfläche der Binderschicht wurde für die unterschiedlichen Verbundzustände gezielt vorbehandelt. Dabei wurde sowohl der Einbau Heiß-auf-warm realisiert als auch verschiedene Anspritzmittel verwendet. Es hat sich u.a. gezeigt, dass sich das Spurbildungsverhalten bei mangelhaftem Schichtenverbund deutlich verschlechtert. Aus den Ergebnissen der Abscherversuche konnte dagegen kein gesamtschlüssiges Verhalten abgeleitet werden.

Raab [6] beschreibt 1995 ein Forschungsprojekt der EMPA, mit dem sowohl praxis-bezogene Anforderungswerte für den Schichtenverbund entwickelt als auch Grund-lagen für die Herleitung von Kennwerten als Dimensionierungshilfe erarbeitet werden sollen. Es werden zum einen die Vielzahl der den Schichtenverbund beeinflussenden Parameter dargestellt und zum anderen wird versucht, deren Einfluss zu quantifizie-ren.

Leutner [8] stellt bereits 1979 zum einen das von ihm entwickelte Abscherverfahren zur Bestimmung von Scherkraft und Scherweg vor, zum anderen erläutert und disku-tiert er die unternommenen Anstrengungen zur Schaffung von Grenz- und Anforde-rungswerten. Wichtig erscheint der Hinweis, dass er aufgrund der Begutachtung von Schadensfällen auch den Scherwiderstand innerhalb der Schichten ermittelt und die-se Ergebnisse in Relation setzt zum Scherwiderstand an den Schichtgrenzen.

Freund, Codjia und Vassiliou [5] prüften in einer ersten Phase 839 Bohrkernproben hinsichtlich Schichtenverbund nach Leutner und unterschieden dabei 14 Einflussmerkmale – sowohl asphaltechnologische Merkmale, als auch Einbaubedingungen. Anhand der Ergebnisse formulierten sie Mindestwerte für die Scherkraft als auch für den Scherweg. In einer zweiten Phase wurde ein Ringversuch mit 15 Prüfstellen durchgeführt und anhand der Ergebnisse die Präzision des Prüfverfahrens bestimmt.

Einen weiteren wesentlichen Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund liefern Grätz und Stöckert [10]. In einem ersten Teil wurde im Rahmen einer Ringanalyse die Präzision des Verfahrens nach Leutner ermittelt. Der zweite Teil umfasste die statistische Auswertung der Prüfergebnisse von 496 Bohrkernen aus insgesamt 31 Streckenabschnitten. Aus dieser Auswertung wurden ein Bewertungshintergrund erarbeitet und Anforderungswerte vorgeschlagen. Der Vergleich mit neueren Untersuchungen aus Österreich und der Schweiz – dort liegen Prüf- und Anforderungsnormen bereits vor - zeigen dabei eine gute Übereinstimmung.

Die Erkenntnisse zur Wirkungsweise unterschiedlicher Verbundsysteme auf die Verformungs- und Standfestigkeitseigenschaften eines mehrschichtigen Asphaltpaketes basieren aber immer noch größtenteils auf Erfahrungen mit verschiedenen Verbundmedien und -mechanismen. Inwieweit aber ein eingeschränkter oder fehlender Verbund zwischen den Schichten eine Schadensentwicklung beschleunigt, ist bisher unbekannt.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

In diesem Forschungsvorhaben sollen durch Verwendung unterschiedlicher Verbundsysteme und Herstellungsverfahren der Schichtgrenze Asphaltdeckschicht / Asphaltbinderschicht die Einflüsse aus Kohäsion, Adhäsion und mechanischer Verzahnung auf die Verformungseigenschaften des Schichtenpaketes qualitativ und quantitativ erfasst werden. Weiterhin soll durch die Quantifizierung der physikalischen Größen des Schichtenverbundes der Zusammenhang mit dem Verformungsverhalten des Asphaltsystems hergestellt werden.

Diese Quantifizierung erfolgt gemäß dem Stand der Technik durch Abscherversuche nach Leutner in der Schichtgrenze und durch Haftzugprüfungen am Schichtenpaket. Sollten innerhalb einer Schicht Materialabrisse auftreten, werden die Untersuchungen der Haftzugprüfungen durch Abscherversuche innerhalb der Schicht ergänzt.

Diese Untersuchungen schließen nahezu nahtlos bisherige Erkenntnisse ab, nehmen Bezug auf neueste Entwicklungen im Asphaltstraßenbau und lassen im Erfolgsfall eine Beurteilung des mechanischen Verhaltens des gesamten Asphaltpaketes in Abhängigkeit des erzielten oder zu erzielenden Schichtenverbundes zu.

1.3 Allgemeine Angaben

Mit Datum vom 23. Juli 2002 wurde das Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig mit der Durchführung des Forschungsvorhabens Nr. AiF 13339 N „Auswirkungen unterschiedlicher Verbundsysteme auf die mechanischen Eigenschaften eines mehrschichtigen Asphaltpaketes“ beauftragt. Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und durch das Deutsche Asphaltinstitut e.V. (DAI) gefördert.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Variationsumfang

Für die experimentellen Untersuchungen werden unterschiedliche Schichtensysteme mit verschiedenen Schichtverbindungen mittels Walzsektor-Verdichter hergestellt.

Als Schichtensysteme werden folgende Kombinationen verwendet:

- Splittmastixasphalt 0/8 S auf Asphaltbinder 0/16 S
- Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S

Bei beiden Schichtsystemen werden sowohl die Herstellverfahren, als auch beim Verfahren Heiß-auf-kalt die Vorspritzmittel variiert:

- Heiß-auf-heiß (Kompaktasphalt)
- Heiß-auf-warm
- Heiß-auf-kalt
 - ohne Vorspritzmittel
 - Haftkleber
 - Bitumenemulsion U 60 K
 - polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C 2 (gemäß TL PmOB)

Für die Untersuchung der Verdichtung sowie der Hohlraumverhältnisse in den Systemen werden Asphaltprobeplatten in Schichthorizonte geteilt und daran die relativen Raumdichten bestimmt.

Zur Ansprache der Schichtenverbindung werden der Schichtenverbund gemäß der Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner und die Haftzugfestigkeit in Anlehnung an die Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil 9: Bestimmung der Haftzugfestigkeit von Dünnen Schichten im Heiß- und Kalteinbau bestimmt.

Zur Ansprache des Verformungsverhaltens wird der Spurbildungsversuch in Anlehnung an die Technische Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau, TP A-StB, Teil Spurbildungsversuch - Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad sowie der dynamische Stempeleindringversuch in Anlehnung an das Forschungsvorhaben AiF Nr. 12522 N [11] durchgeführt.

Vorab werden Optimierungsversuche durchgeführt, um eine optimale Vorspritzmenge in Abhängigkeit der Art des Vorspritzmittels zu bestimmen. An beiden Schichtensystemen werden die Vorspritzmittelmengen der drei Vorspritzmittel jeweils dreifach variiert und der Verbund mit dem Prüfverfahren „Schichtenverbund nach Leutner“ beurteilt. Als Kriterium für die optimale Vorspritzmittelmenge wird für das jeweilige Vorspritzmittel die höchste ermittelte Scherkraft herangezogen. Zur Sicherung der Prüfergebnisse werden die Prüfungen dreifach belegt.

2.2 Auswahl und Eigenschaften der Baustoffe

Die Auswahl der Baustoffe erfolgte zunächst nach den Vorgaben des Forschungsantrages. Danach wurden Proben von ca. 3 t Asphaltbindermischgut 0/16, ca. 1,5 t Splittmastixasphalt 0/8 sowie ca. 1,5 t Asphaltbeton 0/11 an verschiedenen Mischwerken entnommen und deren Zusammensetzungen bestimmt.

Anhand der Mischgutanalysen musste festgestellt werden, dass die Deckschichtasphalte nicht den festgelegten Soll-Zusammensetzungen gemäß den zugrundeliegenden Eignungsprüfungszeugnissen in Verbindung mit den ZTV Asphalt-StB 01 entsprachen, so dass nochmals ca. 1,5 t Splittmastix 0/8 sowie ca. 1,5 t Asphaltbeton 0/11 S aus der laufenden Produktion von unterschiedlichen Mischwerken entnommen wurden. Da die Zusammensetzung des SMA 0/8 wiederum nicht der Soll-Vorgabe entsprach, wurde eine dritte Probenahme durchgeführt.

Im Fortgang der Untersuchungen wurden von der Betreuergruppe die Maßgaben des Forschungsantrages dahingehend verändert, standfestere Asphalte zu verwenden. Statt des Asphaltbinders 0/16 sollte ein Asphaltbinder 0/16 S mit polymermodifiziertem Bindemittel (PmB 45 A) verwendet werden. Ebenfalls sollte der Splittmastixasphalt 0/8 durch einen Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 45 A ersetzt werden.

Es wurde danach eine weitere Probenahme von ca. 3 t ABi 0/16 S und ca. 1,5 t SMA 0/8 S – jeweils unter Verwendung von PmB 45 A – durchgeführt. Die bis zur Änderung der Mischgutsorten durchgeführten Voruntersuchungen wurden auf Grund des erheblichen Aufwandes der zusätzlichen Probenahmen nicht wiederholt.

2.2.1 Asphaltbinder 0/16 S

Das Asphaltbindermischgut ABi 0/16 S mit dem Bindemittel PmB 45 A wurde von der Firma Norddeutsche Mischwerke GmbH & Co. KG, Niederlassung ISV - Süd, Mischwerk Hannover zur Verfügung gestellt.

Zur Überprüfung der Homogenität sowie zur Absicherung der Ergebnisse wurden an dem Asphaltbindermischgut 3 Mischgutanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Mischgutanalysen sind in Tabelle 2.1 als Einzelwerte sowie als berechneter Mittelwert zusammenfassend dargestellt und die Mittelwerte in Tabelle 2.2 mit den Anforderungen des Eignungsprüfungszeugnisses in Verbindung mit den ZTV Asphalt-StB 01 verglichen.

Tabelle 2.1 Ergebnisse der Mischgutanalysen ABi 0/16 S

Merkmal	Dim.	x ₁	x ₂	x ₃	$\bar{x}$	s
Bindemittelgehalt	M.-%	4,4	4,6	4,4	4,5	0,1155
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	64,8	66,8	65,2	65,6	1,0583
Elastische Rückstellung	%	74	-	70	72	
Füllergehalt	M.-%	8,2	8,2	9,1	8,5	0,5196
Sandgehalt	M.-%	20,6	20,6	19,8	20,3	0,4619
Splittgehalt > 2,0 mm	M.-%	71,2	71,2	71,1	71,2	0,0577
Größtkorngehalt > 11,2 mm	M.-%	35,1	30,1	37,8	34,3	3,9068
Überkornanteil > 16,0 mm	M.-%	7,3	6,1	7,2	6,9	0,6658
Raumdicke	g/cm ³	2,554	2,561	2,556	2,557	0,0036
Rohdicke	g/cm ³	2,671	2,674	2,676	2,674	0,0025
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,4	4,2	4,5	4,4	0,1528
Hohlraumfüllungsgrad	%	71,4	73,2	71,0	71,9	1,1719

Tabelle 2.2 Vergleich der Mischgutanalyse ABi 0/16 S mit den Anforderungen gemäß EPZ und ZTV Asphalt-StB 01

Merkmal	Dim.	IST	Soll (± Toleranz)	Abw.
Bindemittelgehalt	M.-%	4,5	4,2 (3,7 - 4,7)	-
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	65,6	PmB 45 A ≤ 71	-
Elastische Rückstellung	%	72	≥ 50	-
Füllergehalt	M.-%	8,5	8,0 (5,0 - 11,0)	-
Sandgehalt	M.-%	20,3	20,0 (12,0 - 28,0)	-
Splittgehalt > 2,0 mm	M.-%	71,2	72,0 (64,0 - 80,0)	-
Größtkorngehalt > 11,2 mm	M.-%	34,3	30,2 (24,2 - 36,2)	-
Überkornanteil > 16,0 mm	M.-%	6,9	≤ 10,0	-
Raumdicke	g/cm³	2,557	-	-
Rohdicke	g/cm³	2,674	-	-
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,4	4,0 - 7,0 (ZTV Asphalt) (6,5 - 8,0 (MKA [12]))	- (-2,1)
Hohlraumfüllungsgrad	%	71,9	(≤ 62 (MKA [12]))	(+ 9,9)

Das Mischgut Asphaltbinder 0/16 S genügt den Anforderungen gemäß Eignungsprüfungszeugnis in Verbindung mit den ZTV Asphalt-StB 01.

Das Mischgut Asphaltbinder 0/16 S genügt nicht den zusätzlichen Anforderungen gemäß Merkblatt für den Bau kompakter Asphaltbefestigungen, Ausgabe 2001 für das Bauverfahren Heiß-auf-heiß:

- a) Der Hohlraumgehalt unterschreitet den unteren Grenzwert um 2,1 Vol.-%.
- b) Der Hohlraumausfüllungsgrad überschreitet den Anforderungswert um 9,9 %.

Von einer weiteren Probenahme eines Asphaltbinders wurde in Absprache mit dem Betreuungsausschuss abgesehen, da bereits die beprobte Variante ABi 0/16 nicht verwendet werden konnte und für eine zusätzliche Variante der zeitliche Rahmen nicht ausgereicht hätte.

2.2.2 Asphaltbeton 0/11 S

Als Deckschichtvariante wurde ein Asphaltbeton 0/11 S mit dem Bindemittel 50/70 verwendet. Das Asphaltbetonmischgut wurde von der Firma KEMNA BAU Andreae GmbH & Co. KG, Asphaltsplitt-Werk Haverlah zur Verfügung gestellt.

Zur Überprüfung der Homogenität sowie zur Absicherung der Ergebnisse wurden an dem Asphaltbetonmischgut ebenfalls drei Mischgutanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Mischgutanalysen sind in Tabelle 2.3 als Einzelwerte sowie als berechneter Mittelwert zusammenfassend dargestellt und die Mittelwerte in Tabelle 2.4 mit den Anforderungen des Eignungsprüfungszeugnisses in Verbindung mit den ZTV Asphalt-StB 01 verglichen.

Tabelle 2.3 Ergebnisse der Mischgutanalysen AB 0/11 S

Merkmal	Dim.	x ₁	x ₂	x ₃	$\bar{x}$	s
Bindemittelgehalt	M.-%	5,5	5,6	5,5	5,5	0,0577
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	53,2	55,2	56,4	54,9	1,6166
Füllergehalt	M.-%	9,1	8,4	9,4	9,0	0,5132
Sandgehalt	M.-%	35,3	37,6	37,7	36,9	1,3577
Splittgehalt > 2,0 mm	M.-%	55,6	54,0	52,9	54,2	1,3577
Größtkorngehalt > 8,0 mm	M.-%	27,6	26,3	23,5	25,8	2,0952
Überkornanteil > 11,0 mm	M.-%	1,1	0,8	0,0	0,6	0,5686
Raumdicke	g/cm ³	2,544	2,548	2,545	2,546	0,0021
Rohdicke	g/cm ³	2,651	2,646	2,650	2,649	0,0026
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,0	3,7	4,0	3,9	0,1732
Hohlraumfüllungsgrad	%	77,3	79,0	77,3	77,9	0,9815

Tabelle 2.4 Vergleich der Mischgutanalyse AB 0/11 S mit den Anforderungen gemäß EPZ und ZTV Asphalt-StB 01

Merkmal	Dim.	IST	Soll ($\pm$ Toleranz)	Abw.
Bindemittelgehalt	M.-%	5,5	5,7 (5,2 - 6,2)	-
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	54,9	50/70 46 - 62	-
Füllergehalt	M.-%	9,0	9,2 (6,2 - 12,2)	-
Sandgehalt	M.-%	36,9	33,5 (25,5 - 41,5)	-
Splittgehalt > 2,0 mm	M.-%	54,2	57,3 (49,3 - 65,3)	-
Größtkorngesamt > 8,0 mm	M.-%	25,8	25,2 (20,2 - 30,2)	-
Überkornanteil > 11,0 mm	M.-%	0,6	$\leq 10,0$	-
Raumdicke	g/cm ³	2,546	-	-
Rohdicke	g/cm ³	2,649	-	-
Hohlraumgehalt	Vol.-%	3,9	3,0 - 5,0 (ZTV Asphalt) (3,0 - 5,0 (MKA))	- -
Hohlraumfüllungsgrad	%	77,9	(≤ 78 (MKA))	-

Das Mischgut Asphaltbeton 0/11 S genügt den Anforderungen gemäß Eignungsprüfungszeugnis in Verbindung mit den ZTV Asphalt-StB 01.

Das Mischgut Asphaltbeton 0/11 S genügt den zusätzlichen Anforderungen gemäß Merkblatt für den Bau kompakter Asphaltbefestigungen, Ausgabe 2001 [12] für das Bauverfahren Heiß-auf-heiß.

2.2.3 Splittmastixasphalt 0/8 S

Als zweite Deckschichtvariante wurde ein Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 45 A verwendet. Der Splittmastixasphalt wurde von der Firma Norddeutsche Mischwerke GmbH & Co. KG, Niederlassung ISV - Süd, Mischwerk Hannover zur Verfügung gestellt.

Zur Überprüfung der Homogenität sowie zur Absicherung der Ergebnisse wurden an dem Splittmastixasphalt drei Mischgutanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Mischgutanalysen sind in Tabelle 2.5 als Einzelwerte sowie als berechneter Mittelwert zusammenfassend dargestellt und die Mittelwerte in Tabelle 2.6 mit den Anforderungen des Eignungsprüfungszeugnisses in Verbindung mit den ZTV Asphalt-StB 01 verglichen.

Tabelle 2.5 Ergebnisse der Mischgutanalysen SMA 0/8 S

Merkmal	Dim.	x ₁	x ₂	x ₃	$\bar{x}$	s
Bindemittelgehalt	M.-%	6,8	6,9	6,8	6,8	0,0577
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	64,6	68,2	69,8	67,5	2,6633
Elastische Rückstellung	%	73	68	60	67	6,5574
Füllergehalt	M.-%	9,0	8,3	7,7	8,3	0,6506
Sandgehalt	M.-%	15,4	16,6	16,7	16,2	0,7234
Splittgehalt > 2,0 mm	M.-%	75,6	75,1	75,6	75,4	0,2887
Größtkorngesamt > 5,0 mm	M.-%	59,4	59,6	57,3	58,8	1,2741
Überkornanteil > 8,0 mm	M.-%	8,5	7,8	7,8	8,0	0,4041
Raumdicke	g/cm ³	2,462	2,468	-	2,465	-
Rohdicke (Wasser)	g/cm ³	2,576	2,565	2,569	2,570	0,0056
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,4	3,8	-	4,1	-
Hohlraumfüllungsgrad	%	78,8	81,4	-	80,1	-

Tabelle 2.6 Vergleich der Mischgutanalyse SMA 0/8 S mit den Anforderungen gemäß EPZ und ZTV Asphalt-StB 01

Merkmal	Dim.	IST	Soll ($\pm$ Toleranz)	Abw.
Bindemittelgehalt	M.-%	6,8	7,0 (6,5 – 7,5)	-
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	67,5	PmB 45 A ≤ 71	-
Elastische Rückstellung	%	67	≥ 50	-
Füllergehalt	M.-%	8,3	10,0 (7,0 – 13,0)	-
Sandgehalt	M.-%	16,2	15,0 (7,0 – 23,0)	-
Splittgehalt > 2,0 mm	M.-%	75,4	75,0 (67,0 – 83,0)	-
Größtkorngehalt > 5,0 mm	M.-%	58,8	57,8 (46,2 – 69,4)	-
Überkornanteil > 8,0 mm	M.-%	8,0	$\leq 10,0$	-
Raumdichte	g/cm ³	2,465	-	-
Rohdichte	g/cm ³	2,570	-	-
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,1	3,0 – 4,0 (1,5 – 5,5) (3,5 – 5,0 (MKA [12]))	- (-)
Hohlraumfüllungsgrad	%	80,1	(≤ 80 (MKA [12]))	(+0,1)

Das Mischgut Splittmastixasphalt 0/8 S genügt den Anforderungen gemäß Eigenschaftsprüfungszeugnis in Verbindung mit den ZTV Asphalt-StB 01.

Das Mischgut Splittmastixasphalt 0/8 S genügt nicht den zusätzlichen Anforderungen gemäß Merkblatt für den Bau kompakter Asphaltbefestigungen, Ausgabe 2001 [12] für das Bauverfahren Heiß-auf-heiß.

Der Hohlraumausfüllungsgrad überschreitet den zulässigen Grenzwert um 0,1 %. Auf Grund der lediglich geringen Überschreitung und dem erheblichen Aufwand einer weiteren Probenahme wurde der SMA 0/8 S für die Untersuchungen verwendet.

2.2.4 Vorspritzmittel

Als Haftbrücke wurden drei unterschiedliche Vorspritzmittel verwendet. Es kamen zwei Bitumenemulsionen vom Typ U 60 K und U 60 K - C2 sowie eine lösemittelhaltige Bitumenemulsion (Haftkleber) zur Anwendung.

Die beiden verwendeten Bitumenemulsionen wurden von der Firma Matthäi Bauunternehmen GmbH & Co. KG, Verden, der Haftkleber von der Firma Rolasphalt Straßenbaustoffe GmbH & Co. KG, Thedinghausen, zur Verfügung gestellt.

2.2.4.1 Haftkleber

Als Grundbitumen für den Haftkleber wurde nach Aussage des Herstellers ein 160/220 verwendet. Die Kenndaten des Haftklebers – im folgenden auch mit HK abgekürzt – sind in der Tabelle 2.7 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2.7: Prüfergebnisse des verwendeten Haftklebers und Anforderungen gemäß DIN 1995 Teil 3

Eigenschaft	Dim.	Anforderung (DIN 1995 Teil 3)	Prüfergebnis
Ladungsart	-	-	kationisch
Äußere Beschaffenheit	-	braun, flüssig, homogen	braun, flüssig, homogen
Wassergehalt	%	≤ 60,0	57,8
Siebrückstand	%	≤ 0,5	0,1
Ausflusszeit mit dem Ausflussgerät 4 mm Düse bei 20 °C	s	≤ 6	4,6
Gewichtsverlust durch Verdunstung	%	≤ 70,0	66,6
Erweichungspunkt Ring + Kugel des Verdunstungsrückstandes	°C	≥ 37,0	37,8
Wassereinwirkung auf Bindemittelüberzug	-	Splitt vollständig umhüllt	Splitt vollständig umhüllt
Benetzungsfähigkeit	min	≤ 20	6,04

Der Haftkleber genügt den Anforderungen gemäß DIN 1995 Teil 3.

2.2.4.2 Bitumenemulsion U 60 K

Die Anforderungen an unstabile kationische Bitumenemulsionen U 60 K gemäß DIN 1995 Teil 3 sowie die Ergebnisse der Prüfungen an den verwendeten Bitumenemulsionen U 60 K sind in Tabelle 2.8 vergleichend gegenübergestellt. Um durch eine längere zeitliche Lagerung die Gefahr der Veränderung der Bitumenemulsion zwischen den Vor- und Hauptversuchen zu vermeiden, wurden für die Vorversuche eine erste Liefercharge, für die Hauptversuche eine zweite Lieferung verwendet.

Tabelle 2.8: Prüfergebnisse der verwendeten Bitumenemulsion U 60 K und Anforderungen gemäß DIN 1995 Teil 3

Eigenschaft	Dim.	Anforderung (DIN 1995 Teil 3)	Prüfergebnis (1. Lieferung)	Prüfergebnis (2. Lieferung)
Ladungsart	-	kationisch	kationisch	kationisch
Äußere Beschaffenheit	-	braun, flüssig, homogen	braun, flüssig, homogen	braun, flüssig, homogen
Wassergehalt	%	≤ 42,0	39,0	40,0
Siebrückstand	%	≤ 0,5	0,02	0,01
Lagerbeständigkeit Siebrückstand nach 4 Wochen	%	≤ 0,5	0,0	0,0
Ausflusszeit mit dem Ausflussgerät 4 mm Düse bei 40 °C	s	≤ 12	6,2	7,6
Art des eingesetzten Straßen- baubindemittels	-	-	100/200	100/200
Eigenschaften des zurückge- wonnenen Bindemittels				
- Asche	%	≤ 2,50	0,05	0,10
- Erweichungspunkt RuK	°C	37,0 - 49,0	38,0	42,0
Brechverhalten	g	≤ 200	125	122
Wassereinwirkung auf Bindemit- telüberzug	-	Splitt vollständig umhüllt	Splitt nur leicht umhüllt	Splitt teilweise umhüllt

2.2.4.3 Bitumenemulsion U 60 K - C2 (gemäß TL PmOB)

Die Anforderungen an unstabile kationische Bitumenemulsionen U 60 K - C2 gemäß der Technischen Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bindemittel für Oberflächenbehandlungen (mit bitumenhaltigen Bindemitteln), TL PmOB, Ausgabe 1997, sowie die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 2.9 vergleichend

gegenübergestellt. Auch von der polymermodifizierten Bitumenemulsion wurden für die Vor- und Hauptversuche zwei Lieferchargen verwendet.

Tabelle 2.9: Prüfergebnisse der verwendeten Bitumenemulsion U 60 K - C2 und Anforderungen gemäß TL PmOB

Eigenschaft	Dim.	Anforderung (TL PmOB)	Prüfergebnis (1. Lieferung)	Prüfergebnis (2. Lieferung)
Ladungsart	-	kationisch	kationisch	kationisch
Äußere Beschaffenheit	-	braun, flüssig, homogen	braun, flüssig, homogen	braun, flüssig, homogen
Wassergehalt	%	≤ 42,0	39,3	40,0
Siebrückstand	%	≤ 0,5	0,02	0,1
Lagerbeständigkeit Siebrückstand nach 4 Wochen	%	≤ 0,5	0,1	0,1
Ausflusszeit mit dem Ausflussgerät 4 mm Düse bei 20 °C	s	≤ 12	6	7,2
Brechverhalten	g	≤ 200	145	195
Wassereinwirkung auf Bindemittel- überzug	-	Splitt vollstän- dig umhüllt	Splitt teilweise umhüllt	Splitt vollstän- dig umhüllt
Brechpunkt nach Fraaß	°C	≤ -10	-5,5	-13,0
Eigenschaften des nach DIN V 52041-2 rückgewonnenen PmOB				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	≥ 50	64,3	61,2
elastische Rückstellung (T = 25 °C)	%	≥ 50	83	82

Die 1. Lieferung der Bitumenemulsion U 60 K - C2 überschreitet den zulässigen Brechpunkt nach Fraaß gemäß TL PmOB um 4,5 °C. Die erste Lieferung wurde ausschließlich für die Optimierungsversuche verwendet, so dass diese Abweichung von der TL PmOB keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen ausübt.

Allen Herstellern sei an dieser Stelle für die kostenfreie Bereitstellung des Asphaltmischgutes sowie der Vorspritzmittel herzlich gedankt.

2.3 Herstellung der Asphaltprobekörper

Nachfolgend wird die Herstellung der Asphaltprobeplatten sowie insbesondere die Herstellverfahren der Plattensysteme beschrieben.

2.3.1 Walzsektor-Verdichtungsgerät

Das Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht aus einer Verdichtungsform mit Einfüllaufsatz und einem Verdichtungskörper in Form eines Sektors einer Walzenbandage. Die auf einen Schlitten montierte Verdichtungsform mit dem Asphaltmischgut wird während der Verdichtung translatorisch hin und her bewegt, wobei der auf den Kreismittelpunkt fixierte Sektor des Walzkörpers mitgeführt wird und auf der Asphaltoberfläche eine wiegeartige Bewegung vollzieht.

Das Asphaltmischgut wird in die rechteckige Verdichtungsform eingefüllt und bei definierten Temperaturverhältnissen zunächst weggeregelt vorverdichtet. Die weggeregelterte Vorverdichtung simuliert die glättende und verdichtende Wirkweise einer Fertigerbohle. Die Hauptverdichtung - die Simulation des Walzeneinsatzes - erfolgt bei definierter Laststeigerung kraftgeregelt.

Das Funktionsprinzip des Walzsektor-Verdichtungsgerätes kann der Abbildung 2.1 entnommen werden.

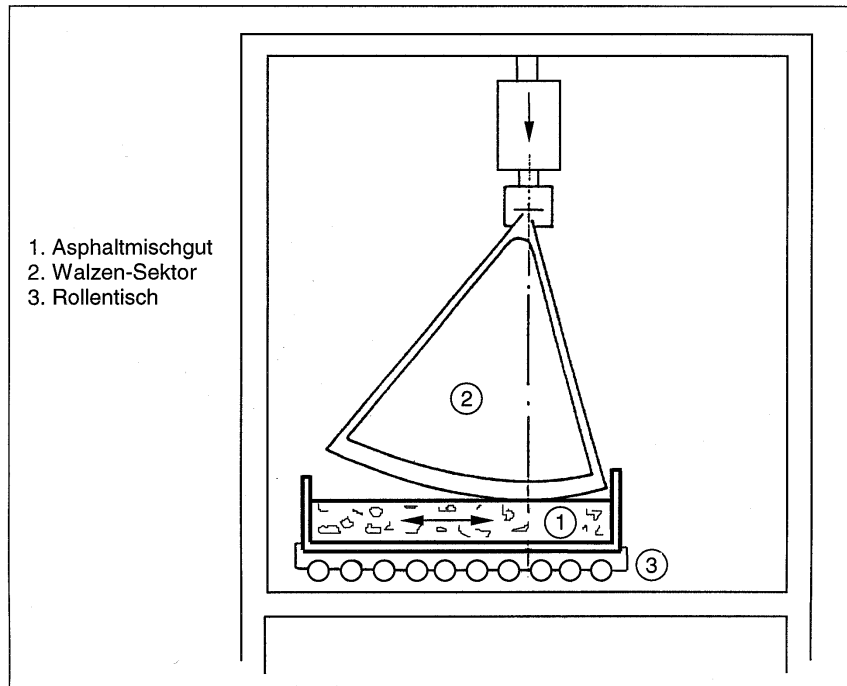


Abbildung 2.1: Funktionsprinzip eines Walzsektor-Verdichtungsgerätes

Die für die Herstellung der Probeplatten erforderliche Mischgutmenge richtet sich nach der angestrebten Endhöhe und der Grundfläche der Verdichtungsform.

Die Verdichtung erfolgt in Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP A-StB Teil: Verfahren zur Herstellung von Asphaltprobeplatten im Laboratorium.

Da bisher keine Erfahrungswerte über die labortechnische Verdichtung / Verdichtbarkeit von Asphaltssystemen mit mehreren Schichten vorliegen, wurde in Vorversuchen das Verdichtungsschema optimiert, um sowohl eine Über- als auch Unterverdichtung der einzelnen Schichten des Systems ausschließen zu können und den unterschiedlichen Herstell- und Verdichtungsverfahren in der Praxis gerecht zu werden.

2.3.2 Verfahren der Asphalt-Temperierung

Die Herstellverfahren Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm erfordern bei dem Einbau des Deckschichtasphaltes jeweils eine gleichbleibende Temperatur der Asphaltbinderschicht, um Plattensysteme mit vergleichbaren Eigenschaften herzustellen.

Vorab wurden daher Untersuchungen zur Wiedererwärmung der Asphalte durchgeführt, um eine gleichbleibend konstante Verdichtungstemperatur von 135°C gewährleisten zu können. Dies war Voraussetzung, um durch gezieltes Abkühlen der verdichteten Asphaltbinderplatte in der Verdichtungsform eine einheitliche Oberflächentemperatur für die jeweiligen Asphaltssysteme sicherzustellen.

Für die Probeteilung wurde der Asphalt in einem verschlossenen Blecheimer in einem Wärmeschrank bei $T = 110^\circ\text{C}$ für 6 Stunden temperiert. Die entsprechende Mischgutmenge zur Herstellung einer Asphaltbinderplatte wurde dann in einen weiteren Blecheimer gefüllt, mit einem Deckel verschlossen und in einem Wärmeschrank bei $T = 160^\circ\text{C}$ für 2,5 Stunden temperiert. Danach wurde die Temperatur im Wärmeschrank auf 137°C gesenkt und das Mischgut weitere 30 Minuten temperiert.

Mit diesem Temperierschema wurde sichergestellt, dass das Mischgut sowohl in der Mitte als auch am Randbereich des Blecheimers nach der Temperierdauer von 2,5 Stunden eine Temperatur zwischen 128°C und 148°C aufwies. Nach der Reduzierung der Temperatur im Wärmeschrank auf 137°C und einer weiteren Lagerung von mindestens 30 Minuten wurden im Mischgut nahezu homogene Temperaturen zwischen 134°C und 139°C gemessen. Nach dem Einfüllen des Asphaltes in die beheizte Verdichtungsform des Walzsektor-Verdichtungsgerätes wurde an insgesamt sechs hergestellten Platten vor dem Beginn der Verdichtung eine Oberflächentemperatur von $137,5 \pm 1,5^\circ\text{C}$ gemessen, so dass eine gleichbleibende Verdichtungstemperatur sichergestellt werden konnte.

2.3.3 Herstellverfahren Heiß-auf-kalt

Für die Herstellung der Asphaltssysteme Heiß-auf-kalt wird das Asphaltbindermischgut in die Verdichtungsform eingefüllt und mit dem festgelegten Verdichtungsregime (16 Überrollungen - Glättung; 16 Überrollungen - Anstieg der Kraft bis zur Maximal-

kraft; 16 Überrollungen - Reduzierung der Kraft) verdichtet. Danach wird die Asphaltbinderplatte aus dem Verdichtungsgerät ausgebaut und bei Raumtemperatur für 7 ± 1 Tage planeben gelagert. Die festgelegte Lagerungsdauer soll zum einen eine ausreichende Abkühlung der Platte gewährleisten, zum anderen eine Verschmutzung der Oberfläche bei einer zu langen Lagerung verhindern.

Nach der Lagerung wird die Probeplatte mit dem Vorspritzmittel behandelt und anschließend für weitere 2 Tage bei Raumtemperatur gelagert. Diese Lagerung soll ein vollständiges Brechen und Abtrocknen der Vorspritzmittel vor der Herstellung der Deckschicht ermöglichen.

Danach wird die kalte Asphaltbinderplatte wieder in die Verdichtungsform des Walzsektor-Verdichter eingebaut und der Deckschichtasphalt aufgefüllt. Die Verdichtung der Asphaltdeckschicht erfolgt mit dem gleichen Verdichtungsregime des Asphaltbinders.

2.3.4 Herstellverfahren Heiß-auf-warm

Die Herstellung von Asphaltbefestigungen mit dem Verfahren Heiß-auf-warm erfolgt in der Praxis mit zwei Fertigern und zwei Walzenzügen. Zunächst wird die untere Asphaltsschicht aufgebracht und unter Einsatz des ersten Walzenzuges verdichtet. Im Anschluss erfolgt die Herstellung der oberen Asphaltsschicht, die mit dem Einsatz des zweiten Walzenzuges verdichtet wird, dabei muss beim Einbau der oberen Schicht die Oberfläche der Unterlage eine Temperatur von mindestens 80 °C aufweisen.

Für die labortechnische Herstellung der Schichtensysteme wird das Einbauverfahren Heiß-auf-warm simuliert, indem zunächst das Asphaltbindermischgut im Walzsektor-Verdichter mit dem Verdichtungsregime des Verfahrens Heiß-auf-kalt weg- und kraftgeregelt verdichtet wird. Anschließend wird die Asphaltbinderplatte in der Verdichtungsform für 30 bis 40 Minuten auf eine Oberflächentemperatur zwischen 80 °C bis 90 °C abgekühlt. Danach wird der Deckschichtasphalt aufgebracht und das Gesamtsystem weg- und kraftgeregelt verdichtet.

2.3.5 Herstellverfahren Heiß-auf-heiß

Für die Herstellung der Asphaltbefestigungen mit dem Verfahren Heiß-auf-heiß, der sogenannte Kompaktasphalt, können in der Praxis zwei Verfahren angewandt werden. Die Schichten können mit zwei unmittelbar hintereinander fahrenden Fertigern oder aber mit einem Spezialfertiger eingebaut werden. Bei beiden Einbauweisen werden die untere und die obere Asphaltschicht durch die beiden Fertigerbohlen einzeln vorverdichtet. Die Walzverdichtung erfolgt nach der Herstellung der oberen Asphaltschicht, d.h. beide Schichten werden gemeinsam verdichtet.

Für die labortechnische Herstellung der Schichtensysteme wird das Einbauverfahren Heiß-auf-heiß simuliert, indem zunächst der Asphaltbinder im Walzsektor-Verdichter weggeregelt verdichtet wird (Simulation der ersten Fertigerbohle). Anschließend wird der Deckschichtasphalt aufgebracht und das System weg- (zweite Fertigerbohle) und kraftgeregelt (Walzeneinsatz) verdichtet.

2.3.6 Aufbringen des Vorspritzmittels

Für das Aufbringen der Vorspritzmittel wurden im Rahmen von Optimierungsversuchen mehrere Verfahren getestet, um eine praxisgerechte Verteilung zu erreichen. Gleichzeitig musste eine zielgenaue Dosierung sichergestellt werden.

Als Verfahren zum Aufbringen der Vorspritzmittel wurden Pinsel, Schaumstoff-Farbbrollen (Lackierrollen), Wassersprühflaschen und eine druckluftbetriebene Lackierpistole getestet.

Der Pinsel zum Aufstreichen wurde auf Grund der ablösenden Pinselhaare und des ungleichmäßigen Auftrages nicht verwendet.

Als zielführendes Verfahren zum Aufbringen des Haftklebers hat sich eine Wassersprühflasche aus Kunststoff erwiesen. Durch die Rückwägung der Probeplatte war eine genaue Dosierung und durch den Sprühnebel eine gleichmäßige Verteilung des Vorspritzmittels sichergestellt.

Die dickflüssigeren Bitumenemulsionen konnten mit der Wassersprühflasche nicht verarbeitet werden. Auf die Verwendung von der druckluftbetriebenen Farbspritzpistole, die mit entsprechend großer Bedüsung die Emulsion spritzen konnte, wurde auf Grund einer extremen Nebelbildung verzichtet. Hier hat sich eine Schaumstoff-Farbrolle als zielführend erwiesen. Durch das Aufrollen und das gleichzeitige Eindrücken des Schaumstoffes in die Unebenheiten der Asphaltoberfläche wurde ebenfalls eine gleichmäßige Verteilung der Bitumenemulsionen auf der Probeplatte sichergestellt.

2.3.7 Bezeichnung der Varianten

Um die hergestellten Asphaltvarianten zuordnen zu können, wurde in Abhängigkeit der Herstellungsvariante sowie des verwendeten Vorspritzmittels eine eindeutige Bezeichnung festgelegt. Die Bezeichnung der Asphaltvarianten und die entsprechende Zuordnung können der Tabelle 2.10 entnommen werden.

Zusätzlich zu den vorgesehenen Varianten wurden durch Sandstrahlen und Lagern der Asphaltbinderprobeplatten im Freien vor dem Aufbringen der Vorspritzmittel bewitterte Varianten hergestellt (vgl. Kapitel 2.6). Die Bezeichnung und Zuordnung der bewitterten Varianten kann der Tabelle 2.11 entnommen werden.

Tabelle 2.10: Bezeichnung der hergestellten Asphaltssysteme

System	Verdichtung / Vorspritzmittel		Bezeichnung der Variante
AB 0/11 S / ABi 0/16 S	Heiß-auf-kalt	ohne	A 10
		Haftkleber	A 11
		Emulsion U60K	A 12
		Emulsion U60K C2 (gemäß TL PmOB)	A 13
	Heiß-auf-warm (ca. 80°C)		A 20
	Heiß-auf-heiß (Kompaktasphalt)		A 30
SMA 0/8 S / ABi 0/16 S	Heiß-auf-kalt	ohne	S 10
		Haftkleber	S 11
		Emulsion U60K	S 12
		Emulsion U60K C2 (gemäß TL PmOB)	S 13
	Heiß-auf-warm (ca. 80°C)		S 20
	Heiß-auf-heiß (Kompaktasphalt)		S 30

Tabelle 2.11: Bezeichnung der hergestellten bewitterten Asphaltssysteme

System	Verdichtung / Vorspritzmittel		Bezeichnung der Variante
AB 0/11 S / ABi 0/16 S	Heiß-auf-kalt	ohne	AW 10
		Haftkleber	AW 11
		Emulsion U60K	AW 12
		Emulsion U60K C2 (gemäß TL PmOB)	AW 13
SMA 0/8 S / ABi 0/16 S	Heiß-auf-kalt	ohne	SW 10
		Haftkleber	SW 11
		Emulsion U60K	SW 12
		Emulsion U60K C2 (gemäß TL PmOB)	SW 13

2.4 Prüfverfahren

Nachfolgend werden die Prüfverfahren zur Ansprache des Systemverhaltens des Schichtenpaketes vorgestellt. Da das gesamte Schichtensystem prüftechnisch angesprochen werden sollte, mussten die Prüfbedingungen einiger Prüfverfahren optimiert werden.

2.4.1 Prüfverfahren zur Beurteilung der Hohlraumverhältnisse

Für die Bestimmung der Hohlraumverhältnisse im Schichtensystem wurde das System in mehrere Schichthorizonte geschnitten. Dabei wurde zunächst die Asphaltdeckschicht an der Schichtgrenze von der Asphaltbinderschicht getrennt. Die verbleibende Asphaltbinderschicht wurde zusätzlich in der Schichtmitte in zwei Horizonte geteilt. Von einer Teilung der Deckschicht wurde abgesehen, da diese in einigen Verbundsystemen lediglich eine Dicke von 2,5 cm aufweist und hier eine zusätzliche horizontale Teilung nicht sinnvoll erscheint.

Die drei Schichthorizonte des Asphaltsystems wurden jeweils in 9 Einzelstücke gesägt, um die Hohlraumverteilung auch innerhalb des Schichthorizontes bestimmen zu können. An den insgesamt 27 Einzelstücken jeder Systemvariante wurde die relative Raumdichte mittels Tauchwägevorgang gemäß DIN 1996 Teil 4 bestimmt sowie der Hohlraumgehalt und der Verdichtungsgrad berechnet.

2.4.2 Prüfungen zur Beurteilung des Schichtenverbundes

Die prüftechnische Ansprache des Schichtenverbundes erfolgt mit zwei Prüfverfahren, dem Abscherversuch nach Leutner und der Haftzugprüfung.

Mit dem Abscherversuch nach Leutner wird nicht nur die Güte des Schichtenbindungssystems geprüft – das Ergebnis wird ebenfalls durch die Oberflächenrauheit des Asphaltbinders und die dadurch entstehende, von der Korngrößenverteilung der Deckschicht abhängige, Verzahnung von Deck- und Binderschicht beeinflusst.

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit wird durch die Oberflächenrauheit des Binders nicht in dem Maße wie bei der Abscherprüfung beeinflusst, da die Zugbelastung orthogonal auf die Verbundfläche wirkt (Abreißprüfung).

Die Berücksichtigung der Ergebnisse beider Prüfverfahren lässt somit eine umfassende Beurteilung des Schichtenverbundes zu.

2.4.2.1 Schichtenverbund nach Leutner

Die Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner wurde gemäß den Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB, Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner, Ausgabe 1999 durchgeführt.

Für die Prüfung wurden aus den Probeplatten Bohrkerne mit einem Durchmesser von ca. 151 mm entnommen (gem. ALP A-StB, Teil 4 zulässige Bohrkerndurchmesser: 150 ± 2 mm). Aus einem Plattensystem wurden zwei Bohrkernproben hergestellt und die Schichtgrenze farbig markiert.

Danach wurden die Bohrkernproben für mindestens 12 Stunden im Luftbad auf 20 ± 1 °C temperiert und anschließend in das Schergerät eingebaut. Die Scherbelastung erfolgte mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 ± 3 mm/min.

Als Ergebnis wurde die maximale Scherkraft sowie das Diagramm Scherkraft über Scherweg ausgegeben. Zur Ermittlung des Scherweges wurde das Diagramm gemäß ALP A-StB, Teil 4 ausgewertet und der Scherweg zeichnerisch bestimmt.

2.4.2.2 Haftzugfestigkeit

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit erfolgte in Anlehnung an die Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB, Teil 9: Bestimmung der Haftzugfestigkeit von dünnen Schichten im Heiß- und Kalteinbau, Ausgabe 2003.

In Abweichung der Arbeitsanleitung wurde nicht die Haftzugfestigkeit einer dünnen Schicht geprüft, sondern der Verbund zwischen Deckschicht und Binderschicht. Die Prüfbedingungen wurden aber zunächst nicht verändert.

Aus den hergestellten Asphaltprobepplatten wurden Bohrkernproben mit einem Durchmesser von ca. 151 mm entnommen. Ein planparalleles Schleifen der Bohrkernunterseite war auf Grund der orthogonal geführten Bohrkrone des Labor-Bohrgerätes nicht notwendig – lediglich die Oberfläche des Bohrkerns wurde plan geschliffen, um die Haftung des Klebers zwischen Zugstempel und Asphaltoberfläche zu verbessern.

Anschließend wurde eine Ringnut mit einem Innendurchmesser von 100 mm durch die gesamte Deckschicht bis ca. 10 mm in die Binderschicht mit einem Kernbohrgerät hergestellt. Senkrecht zur Mantelfläche der Bohrkernprobe, ca. 20 mm unterhalb der Schichtgrenze, wurde in der Binderschicht ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 8 mm zur Messung der Temperatur im Bohrkern hergestellt. Die Abbildung 2.2 zeigt die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

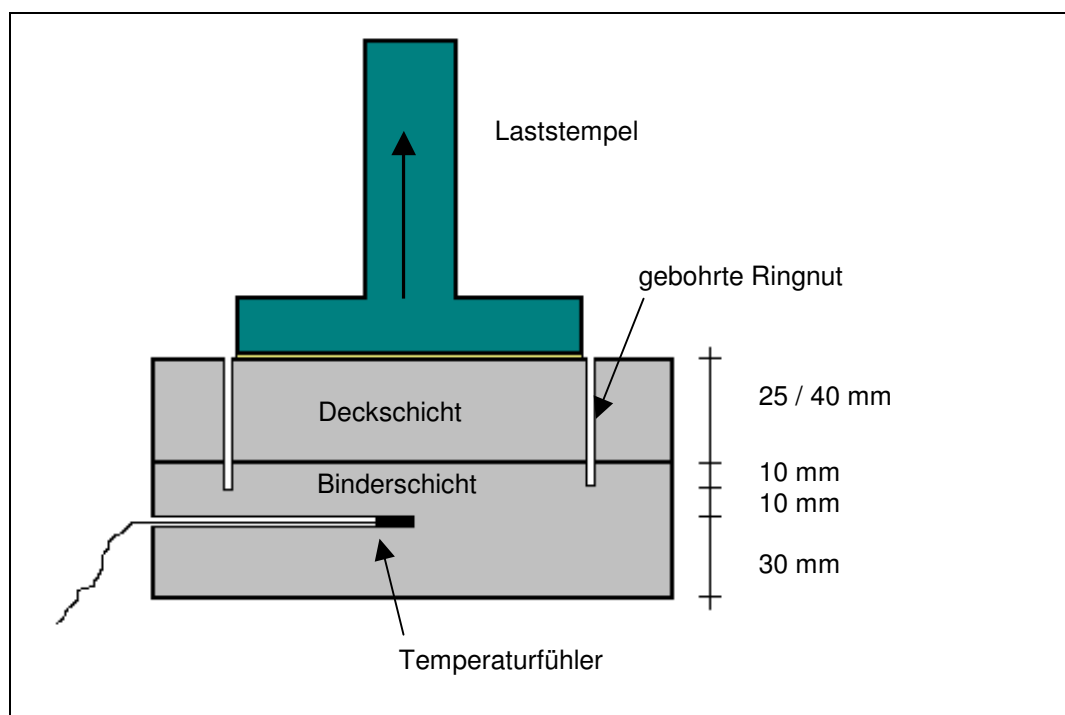


Abbildung 2.2: Haftzugversuch – schematische Darstellung

Die vorbereitete Bohrkernprobe wurde bis zur Massenkonzanz bei Raumtemperatur getrocknet und der Belastungsstempel ($\varnothing$ 100 mm) auf die Prüffläche geklebt. Anschließend wurde der Bohrkern mindestens 12 Stunden auf $8 \pm 0,5^\circ\text{C}$ temperiert und danach in die Prüfapparatur eingesetzt. An dem eingesetzten Thermometer wurde kontinuierlich die Temperatur im Inneren des Bohrkerns geprüft und nach dem Erreichen der Prüftemperatur von $10 \pm 0,5^\circ\text{C}$ die Prüfung gestartet.

Die Prüfung besteht aus einer Zugbelastung mit einer Laststeigerung von $0,025 \text{ N/mm}^2 / \text{s}$, die auf den Prüfstempel bis zum Abriss beaufschlagt wurde. Nach dem Versagen des Asphaltes wurde der Durchmesser der Prüffläche im Bereich des Bruches gemessen sowie die Bruchklassifizierung angegeben. Die Bruchklassifizierung beschreibt die Lage der Bruchebene – innerhalb welcher Schicht der Bruch erfolgte, bzw. ob das Asphaltsystem an der Schichtgrenze versagt hat. Das Ergebnis des Haftzugversuchs wird als Haftzugfestigkeit β_{HZ} in N/mm^2 angegeben.

Im Laufe der Prüfungen wurde ein Einfluss des Bohrloches auf die Ergebnisse der Haftzugfestigkeit dahingehend festgestellt, dass ein Abriss in der Binderschicht im Einflussbereich des Bohrloches erfolgte. Um diesen Einfluss zu umgehen wurde mit Testversuchen der Verlauf der Temperatur im Inneren der Probe über die Zeit gemessen und für die weiteren Prüfungen eine konstante Zeitdauer von 4 Minuten nach der Entnahme der Probe aus dem Klimaschrank bis zum Start der Prüfung festgelegt. Mit dieser Methode konnte auf die Herstellung des seitlichen Bohrloches verzichtet und trotzdem sichergestellt werden, dass die Probe bei der Prüfung eine Temperatur von $10 \pm 0,5^\circ\text{C}$ aufweist.

2.4.3 Prüfungen zur Beurteilung des Verformungswiderstandes

Anhand von zwei unterschiedlichen Prüfverfahren soll an den Asphaltssystemen das Verformungsverhalten untersucht werden. Der Spurbildungsversuch ist ein bereits etabliertes Verfahren und wird im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen verwendet. Hier liegen Erfahrungswerte für die Prüfung von Asphaltbindermischgut vor.

Der dynamische Stempeleindringversuch ist ein relativ neu entwickeltes Prüfverfahren (siehe AiF Forschung Nr. 12522N [11]), mit dem das Verformungsverhalten von

Asphalten auf Grund der sinusimpulsförmigen Belastung mit Lastpausen praxisnah angesprochen werden kann.

2.4.3.1 Spurbildungsversuch

Die Durchführung des Spurbildungsversuchs erfolgt in Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, TP A-StB, Teil: Spurbildungsversuch - Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad, Ausgabe 1997.

In Abweichung der Prüfvorschrift wurde im Einvernehmen der Betreuergruppe das Stahlrad durch das Gummirad ersetzt und, um den unerwünschten Stripping-Effekt auszuschließen, die Temperierung im Luftbad festgelegt.

Da bisher keine Erfahrungen bei der Prüfung von mehrschichtigen Asphaltssystemen vorlagen, wurde zusätzlich das Belastungsgewicht variiert. Dies sollte sicherstellen, dass das gesamte Schichtenpaket prüftechnisch angesprochen werden kann. Zusätzlich wurde im Rahmen der Optimierungsversuche die Prüftemperatur von $T = 50^{\circ}\text{C}$ auf $T = 60^{\circ}\text{C}$ erhöht. Als Ergebnis wird die Spurrinnentiefe [mm] angegeben. Zusätzlich werden ausgewählte Schichtensysteme orthogonal zur Spurrinne geschnitten und anhand der Schnittflächen das Verhalten beider Schichten visuell beurteilt.

2.4.3.2 Dynamischer Stempeleindringversuch

Aus den hergestellten Schichtensystemen werden für den dynamischen Stempeleindringversuch Bohrkerne mit einem Durchmesser von 200 mm gebohrt und anschließend bei Raumtemperatur bis zur Massenkonstanz getrocknet. Für die Prüfung wird der Probekörper in zwei ringförmige Halbschalen gelegt, die mittels Verschraubungen zu einem geschlossenen Metallring zusammengefügt werden. Der Innendurchmesser des Metallringes entspricht dabei genau dem Außendurchmesser des Probekörpers. Die so fixierte Probe wird sechs Stunden mit der Prüftemperatur von $+ 50^{\circ}\text{C}$ in der Klimakammer der Prüfapparatur temperiert.

Nach dem Ende der Temperierung wird die Prüfung gestartet, wobei sich der Laststempel über ein Kugelgelenk an die Oberfläche des Probekörpers anpassen kann.

Der dynamische Stempeleindringversuch wird mit den in [11] festgelegten Prüfparametern durchgeführt. Danach wird mit folgenden Bedingungen geprüft:

Probekörperdurchmesser:	200 mm
Stempeldurchmesser:	80 mm
Prüftemperatur:	+ 50 °C
Belastungsart:	Sinusförmiger Lastimpuls von 0,2 s Dauer mit einer Lastpause von 1,5 s Dauer
Unterspannung:	0,02 MPa
Oberspannung:	0,8 MPa
Versuchsdauer:	10.000 Lastwechsel

Als Ergebnis wird die dynamische Stempeleindringtiefe in [mm] sowie die relative dynamische Stempeleindringtiefe in [%] nach 10.000 Lastwechseln angegeben.

Das Belastungsschema sowie der schematische Versuchsaufbau sind in der Abbildung 2.3 dargestellt.

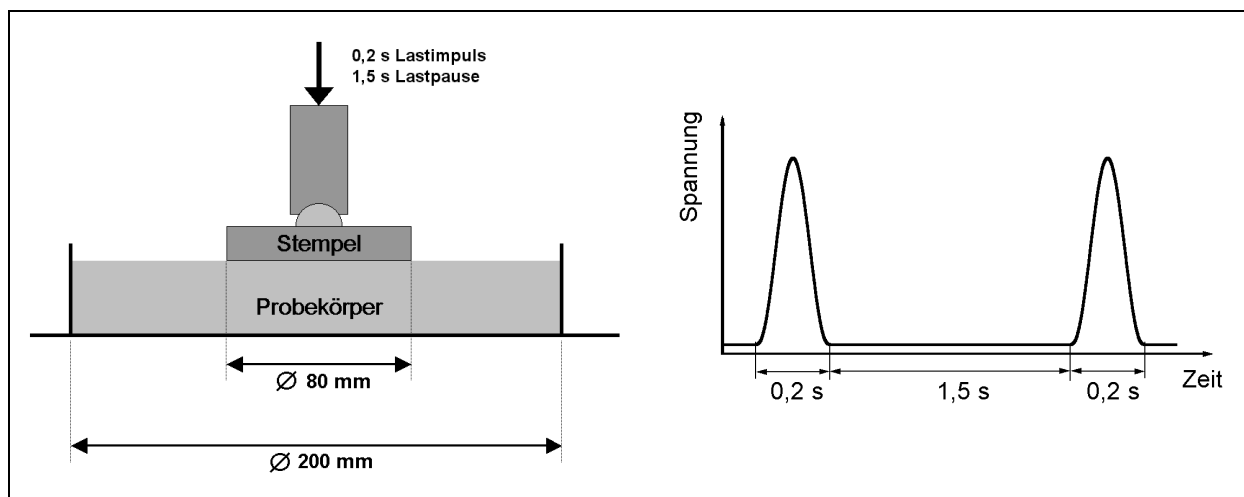


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus sowie der sinusförmigen Impulsbelastung

2.5 Festlegung einer Versuchsstrecke und Probenahme von Bohrkernen

Im Zuge der Beschaffung der Vorspritzmittel wurde von der Firma Matthäi Bauunternehmen GmbH & Co. KG, Verden, Interesse an den Untersuchungen bekundet und die Prüfung von Bohrkernen aus einer Versuchsstrecke mit den zur Anwendung kommenden Vorspritzmitteln angeregt. Als Versuchsstrecke konnte die Sanierung der Landesstrasse L 370 , Husum – Rehburg, mit Einverständnis des Niedersächsischen Landesamtes für Straßenbau sowie des Straßenbauamtes Nienburg gewonnen werden.

Zur Herstellung des Asphaltüberbaus der L 370 wurden vergleichbare Asphaltarten wie in den labortechnischen Untersuchungen, nämlich Asphaltbinder 0/16 S mit PmB 45 A und Asphaltbeton 0/11 S mit dem Bindemittel 50/70 verwendet. Als Vorspritzmittel kam auf der Strecke gemäß Bauvertrag die Bitumenemulsion U 60 K - C2 zum Einsatz. Zusätzlich wurden zwei Testfelder angelegt und mit der Bitumenemulsion U 60 K sowie dem Haftkleber vorbehandelt. Alle verwendeten Vorspritzmittel entsprechen denen, die für die Laborversuche verwendet wurden (gleiche Hersteller und Handelsbezeichnungen). Als Vorspritzmenge wurde auf alle Testfelder die im Bauvertrag festgelegte Menge von einheitlich 300 g/m² aufgebracht.

Nach Herstellung der Deckschicht wurden aus den Testfeldern jeweils 12 Bohrkernproben, also insgesamt 36 Bohrkernproben entnommen. Jeweils Fünf Bohrkernproben verblieben bei der Firma Matthäi, je sieben Bohrkernproben wurden dem Institut für Straßenwesen überstellt. An den Bohrkernproben wurde der Schichtenverbund nach Leutner sowie die Haftzugfestigkeit geprüft.

Zusätzlich zu dem Untersuchungsrahmen des Forschungsprojektes wurde somit die Möglichkeit zur Validierung der labortechnisch hergestellten Probekörper mit Bohrkernproben aus einem Straßenüberbau mit vergleichbaren Mischgutsorten und Vorspritzmitteln geschaffen.

Die Kosten für die Herstellung der Testfelder, für die Bohrkernentnahme sowie für das durch das Straßenbauamt Nienburg angeordnete Abfräsen und Erneuern der Deckschicht im Bereich der Testfelder wurden durch die Firma Matthäi Bauunternehmen GmbH & Co. KG, Verden getragen. Die Kosten für die zusätzlich zum Ver-

suchsprogramm durchgeführten Prüfungen der Bohrkernproben wurden vom Forschungsnehmer übernommen und sind somit für den Forschungsförderer kostenneutral.

2.6 Bewitterte Varianten

Die für die Durchführung der Forschungsarbeit herzustellenden Asphaltssysteme werden im Labormaßstab mit optimalen Rahmenbedingungen hergestellt. In der Praxis liegen aber häufig keine optimalen Bedingungen vor, so dass zwischen dem Einbau von Binder- und Deckschicht in einem ungünstigen Fall die Oberfläche der Asphaltbinderschicht längere Zeit einer Verkehrsbeanspruchung und auch Verschmutzungen ausgesetzt ist.

Um den Einfluss einer durch Verkehrsbeanspruchung ausgemagerten Asphaltoberfläche labortechnisch zu erfassen, wurden auf Initiative des Forschungsnehmers Asphaltbinderplatten mehrere Monate im Freien gelagert und auf Vorschlag des betreuenden Gremiums zusätzlich an der Oberfläche mittels Sandstrahl beansprucht.

Die Beanspruchung erfolgte mit einer handelsüblichen Sandstrahlpistole, mit der unter einem Druck von 6 bar ein Diabas-Brechsand auf die Oberfläche der Asphaltbinderprobeplatten gestrahlt wurde. Um eine für alle Asphaltbinderprobeplatten einheitliche Belastung zu erreichen, wurde auf jede Asphaltbinderplatte das Volumen von einem Liter Brechsand gleichmäßig auf die Oberfläche gestrahlt.

Nach dem Sandstrahlen wurde eine gleichmäßige Ausmagerung des Bindemittelfilmes an der Oberfläche festgestellt. Die mittels Sandstrahl beanspruchten Asphaltbinderprobeplatten wurden durch Abfegen von oberflächlichem Staub befreit, mit Anspritzmittel vorbehandelt. Nach dem Ablüften des Anspritzmittels wurde der Deckschichtasphalt aufgebracht.

Um eine vollständige Vergleichsvariation zu erhalten, wurden sowohl die drei Vorspritzmittel als auch die beiden Deckschichtasphalte für diese zusätzlichen Untersuchungen verwendet. Als Null-Variante wurden zusätzlich Systeme ohne Vorspritzmit-

tel hergestellt. An den bewitterten Systemen wurde der Schichtenverbund nach Leutner festgestellt und die Haftzugfestigkeit geprüft.

Die Kosten der zusätzlich zum Versuchsprogramm geprüften bewitterten Varianten werden vom Forschungsnehmer getragen und sind für den Forschungsförderer kostenneutral.

2.7 Mathematisch-statistische Verfahren zur Auswertung der Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die mathematisch-statistischen Rechenverfahren zur Behandlung der Messergebnisse beschrieben.

Vor der mathematisch-statistischen Behandlung der Prüfergebnisse wurden die Messwerte jeder Prüfserie mittels Plausibilitätsbetrachtungen und Ausreißertests gemäß Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Erkennen und Behandeln von Ausreißer, Ausgabe 2003 [18] überprüft.

Wurde anhand der mathematischen Ausreißertests ein ausreißerverdächtiger Einzelwert erkannt, wurde der Wert aus der Messserie gestrichen. Wurde anhand von Plausibilitätsbetrachtungen ein abweichender Messwert festgestellt, wurde dieser ebenfalls aus der Messserie gestrichen.

2.7.1 Einfache Varianzanalyse und Mittelwertvergleich

Soll die Gleichheit der Varianzen zweier normalverteilter, von Ausreißern bereinigter Datensätze überprüft werden, so wird nach [19] zunächst die Null-Hypothese aufgestellt, die Varianzen seien gleich:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 .$$

Die Null-Hypothese wird abgelehnt, wenn die aus den Stichprobenvarianzen berechnete Testgröße

$$\hat{F} = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ den für die Freiheitsgrade $v_1 = (n_1 - 1)$ und $v_2 = (n_2 - 1)$ (mit $n_1, n_2 =$ Stichprobenumfang) in [19] tabellierten Schwellenwert der F-Verteilung überschreitet; dann wird die Alternativhypothese

$$H_A : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

angenommen, das heißt, die Hypothese der Varianzhomogenität verworfen. Für die Berechnung der Testgröße $\hat{F}$ wird die Stichprobe mit der größeren Varianz als Nr. 1 mit s_1^2 und die andere als Nr. 2 mit s_2^2 bezeichnet.

Stellt sich die Aufgabe, über einen Mittelwertvergleich festzustellen, ob sich im statistischen Sinne die Mittelwerte zweier Messreihen mit den Anzahlen n_1 und n_2 der verträglichen Einzelwerte unterscheiden, so wird nach [19] die Null-Hypothese formuliert, dass die Mittelwerte gleich seien, das heißt, die Differenz der Mittelwerte im statistischen Sinne gleich Null ist:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 .$$

Die Testgröße $\hat{t}$ zur Überprüfung der Null-Hypothese ist für die Fälle gleicher und ungleicher Stichprobenumfänge sowie gleicher und nichtgleicher Varianzen formelmäßig in Tabelle 2.12 angegeben. Überschreitet die Testgröße $\hat{t}$ bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ die für die Anzahl der Freiheitsgrade v in [19] angegebene Signifikanzschranke der t-Verteilung, so wird die Alternativhypothese

$$H_A : \mu_1 \neq \mu_2$$

akzeptiert; das heißt, die Null-Hypothese auf Homogenität der Stichprobenmittelwerte wird abgelehnt.

Tabelle 2.12: Vergleich zweier Mittelwerte unabhängiger Stichproben normalverteilter Grundgesamtheiten

Stichproben- umfänge	Varianzen	
	gleich: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	ungleich: $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$
gleich: $n_1 = n_2 = n$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}}$ $FG = 2n - 2$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}}$ $FG = n - 1 + \frac{2n - 2}{\frac{s_1^2}{s_2^2} + \frac{s_2^2}{s_1^2}}$
ungleich: $n_1 \neq n_2$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\left[\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \left[\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}}$ $FG = n_1 + n_2 - 2$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$ $FG = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}}$

2.7.2 Multiple Varianzanalysen der 2- und 3-fachen Klassifikation

Mit Hilfe multipler Varianzanalysen können die Einflüsse von zwei und mehr Faktoren auf die Gesamtvariabilität einer Merkmalsgröße und gleichzeitig die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren erkannt und quantitativ ermittelt werden. Das Berechnungsprinzip besteht darin, die Faktoren so einzusetzen, dass sich ihre Effekte und Wechselwirkungen sowie die Variabilität dieser Effekte messen, untereinander vergleichen und gegen die zufällige Variabilität abgrenzen lassen.

Gemäß der Klassifikation von Eisenhart [21] können zur Lösung von Problemen mit varianzanalytischen Methoden grundsätzlich drei Modelle unterschieden werden:

- Modell I mit festen Effekten, wobei die Stufen der Einflussfaktoren gezielt ausgewählt und festgelegt werden,

- Modell II mit zufälligen Effekten, wobei die Stufen der Einflussfaktoren auf Zufallsstichproben aus einer Grundgesamtheit beruhen sowie
- Modell III mit gemischten Effekten, wobei sich die Einflussfaktoren sowohl aus dem Modell I als auch aus dem Modell II ergeben.

Ferner unterscheidet man bei multiplen Varianzanalysen zwischen einer Kreuzklassifikation und einer hierarchischen Klassifikation. Bei der Kreuzklassifikation treten alle Stufen des einen Einflussfaktors in allen Stufen aller anderen Einflussfaktoren auf. Bei der hierarchischen Klassifikation hingegen treten alle Stufen einer Einflussgröße immer nur mit einer Stufe einer anderen Einflussgröße gemeinsam auf.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche sind so angelegt, dass auch Varianzanalysen mit Kreuzklassifikation nach dem Modell I (mit festen Effekten) auf das vorliegende Datenmaterial angewendet werden können.

Zur Verdeutlichung dieser Methode wird eine Drei-Variablen-Klassifikation mit Wiederholungen genommen, nämlich für die Variationsursachen

- Art der Asphaltdeckschicht,
- Bewitterungszustand und
- Art der Vorspritzmittel

mit systematisch ausgewählten Stufen der drei Faktoren. Da die Variabilitätsanteile der einzelnen Einflüsse und ihre Wechselwirkungen an der Gesamtvarianz interessieren, werden die zu prüfenden Daten einer Merkmalsgröße zunächst in folgende Gruppen unterteilt:

Faktor A	mit den Stufen $i = 1$ bis $i = a$,	wobei a Stufen in der
(Art der Asphaltdeckschicht)		Grundgesamtheit auftreten,
Faktor B	mit den Stufen $j = 1$ bis $j = b$,	wobei b Stufen in der
(Bewitterungszustand)		Grundgesamtheit auftreten,

Faktor C mit den Stufen $k = 1$ bis $k = c$, wobei c Stufen in der Grundgesamtheit auftreten.
(Art der Vorspritzmittel)

Da angenommen werden darf, dass durch die systematische Auswahl der Stufen a , b und c jeweils der ganze relevante Bereich der Faktoren A, B und C erfasst wird, kann das Modell I für alle betrachteten Faktoren zugrunde gelegt werden.

Die Anzahl der Stufen beträgt $a = 2$ (AB 0/11 S / SMA 0/8 S), $b = 2$ (frisch / bewittert) und $c = 4$ (ohne / Haftkleber / U 60 K / U 60 K - C2). Insgesamt sind danach $a \cdot b \cdot c = 16$ Stufen vorhanden. Jede Stufe für die Ergebnisse der Haftzugversuche umfasst $n = 3$ Werte.

Die Gesamtzahl der Messwerte ist in diesem Beispiel gleich $N = a \cdot b \cdot c \cdot n = 48$.

Für das Untersuchungsmaterial wurde ein varianzanalytisches lineares Modell gewählt mit der Modellgleichung:

$$x_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}.$$

Hierbei bezeichnet der Index i stets die Nummer der Stufe des Faktors A, der Index j die des Faktors B, der Index k die des Faktors C, während der Index l die Nummer der Beobachtung von $l = 1$ bis n angibt.

Dabei bedeuten:

- x_{ijkl} = einen Messwert, der in der i -ten Stufe des Faktors A, j -ten Stufe des Faktors B, k -ten Stufe des Faktors C und l -ten Messung liegt,
- μ = Gesamtmittel,
- α_i bis γ_l = Stufeneffekt der Faktoren A bis C; die Abweichung der Stufenmittel vom Gesamtmittel,
- $(\alpha\beta)_{ij}$ bis $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = Wechselwirkungseffekt zwischen den im Index angegebenen Stufen der betreffenden Faktoren; so bezeichnet zum Beispiel $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ den Wechselwirkungseffekt zwischen der i -ten Stufe des Faktors A, der j -ten Stufe des Faktors B und der k -ten Stufe des Faktors C,

ε_{ijkl} = Effekt der zufälligen Einflüsse.

In diesem Modell wird vorausgesetzt, dass die Stichproben zufällig aus den $a \cdot b \cdot c$ Grundgesamtheiten entnommen worden sind und dass jede dieser Grundgesamtheiten normalverteilt ist mit statistisch gleicher Varianz σ^2 ; das heißt, die x_{ijk} sollen unabhängig und normalverteilt mit der Varianz σ^2 sein. Für die notwendigen Berechnungen der SQ (Summen der quadratischen Abweichungen) wird folgender Weg gewählt. Zunächst wird die Hilfsgröße K bestimmt:

$$K = \frac{\sum x_{ijkl}^2}{N},$$

wobei x die durch Indizierung gekennzeichneten Messwerte darstellt. Mit der Hilfsgröße K ergeben sich die Einzeleffekte der Faktoren zu:

$$SQ(A) = \sum_i \frac{x_{i...}^2}{n \cdot b \cdot c} - K; \quad v = a - 1,$$

$$SQ(B) = \sum_j \frac{x_{.j..}^2}{n \cdot a \cdot c} - K; \quad v = b - 1,$$

$$SQ(C) = \sum_k \frac{x_{...k}^2}{n \cdot a \cdot b} - K; \quad v = c - 1,$$

sowie die Wechselwirkungseffekte zwischen zwei Faktoren zu:

$$SQ(AB) = \sum_i \sum_j \frac{x_{ij..}^2}{n \cdot c} - K - SQ(A) - SQ(B); \quad v = (a-1) \cdot (b-1),$$

$$SQ(AC) = \sum_i \sum_k \frac{x_{i.k.}^2}{n \cdot b} - K - SQ(A) - SQ(C); \quad v = (a-1) \cdot (c-1).$$

Die übrigen Summen $SQ(BC)$ und deren Freiheitsgrade v werden durch entsprechenden Umtausch der Indices und der jeweiligen Anzahl der Stufen analog berechnet. Für die Wechselwirkungseffekte zwischen drei Faktoren gilt:

$$SQ(ABC) = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{x_{ijk.}^2}{n} - K - SQ(A) - SQ(B) - SQ(C) - SQ(AB) - SQ(AC) - SQ(BC); \quad v = (a-1) \cdot (b-1) \cdot (c-1).$$

Die Gesamtabweichungsquadratsumme (Total) kann mit der Gleichung

$$SQ(To) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l x_{ijkl}^2 - K; \quad v = (a \cdot b \cdot c \cdot n) - 1 = N - 1$$

bestimmt werden.

Die Rest- oder Fehlerquadratsumme wird wie folgt festgestellt:

$$\begin{aligned} \text{SQ(R)} &= \text{SQ (To)} - \text{SQ (A)} - \text{SQ (B)} - \text{SQ (C)} - \text{SQ (AB)} - \text{SQ (AC)} \\ &\quad - \text{SQ (BC)} - \text{SQ (ABC)} \\ v &= a \cdot b \cdot c \cdot (n-1). \end{aligned}$$

Die Mittleren Quadrate MQ lassen sich durch Teilung der Summen der Abweichungsquadrate SQ durch die zugehörigen Freiheitsgrade ermitteln.

Mit Hilfe des F-Tests ist dann zu untersuchen, ob die Effekte der Einflussfaktoren und der Wechselwirkungen signifikante Änderungen der Merkmalsgröße bewirken. Gemäß der gestellten Aufgabe sind folgende Null-Hypothesen zu prüfen: Die Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen bewirken in allen Stufen jeweils keinen Effekt. Wird die Null-Hypothese angenommen, so besteht kein Unterschied zwischen den Mittelwerten der Stufen des zu prüfenden Effekts, was bedeutet, dass die Unterschiede zwischen den Stufen dieses Effekts keinen Einfluss auf die Merkmalsänderungen ausüben.

Die Prüfung der Null-Hypothesen erfolgt jeweils durch Vergleich eines rechnerischen $\hat{F}$ -Werts, gebildet aus dem Quotienten des jeweiligen Mittleren Quadrats MQ und dem Mittleren Quadrat des Resteinflusses, mit einem theoretischen F-Wert. Ist die Prüfgröße $\hat{F}$ größer als der tabellierte F-Wert der Fisher-Verteilung, so wird die entsprechende Null-Hypothese nicht akzeptiert, das heißt, die der geprüften Variationsursache zugeordnete Varianz ist nicht zufällig, sondern signifikant unterschiedlich von der Fehlervarianz.

Die rechnerischen $\hat{F}$ -Werte und die zugehörigen Freiheitsgrade lassen sich für das gewählte varianzanalytische Modell mit festen Effekten aus folgenden Beziehungen ermitteln:

$$\hat{F}(\text{A}) = \frac{\text{MQ(A)}}{\text{MQ(R)}} ; \quad v_1 = (a - 1), v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(\text{B})$; $\hat{F}(\text{C})$ und deren zugehörige Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(\text{AB}) = \frac{\text{MQ(AB)}}{\text{MQ(R)}} ; \quad v_1 = (a - 1) \cdot (b - 1), v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(\text{AC})$; $\hat{F}(\text{BC})$ und deren zugehörige Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(ABC) = \frac{MQ(ABC)}{MQ(R)} ; v_1 = (a - 1) \cdot (b - 1) \cdot (c - 1),$$

$$v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

Die theoretischen F-Werte werden jeweils für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für die zugehörigen Freiheitsgrade v_1 und v_2 ermittelt.

Weiterhin werden die Varianzkomponenten der Haupt- und Wechselwirkungen ermittelt, um die Effekte dieser Wirkungen abschätzen zu können. In Anlehnung an Weber [20] erweisen sich die Mittleren Quadrate MQ als Summen von Varianzkomponenten, die die Wirkungen und Wechselwirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren charakterisieren. Für das gewählte Modell mit festen Effekten lassen sich so nach [20] die Varianzkomponenten s^2 aus folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\begin{aligned} MQ &= E(MQ), \\ MQ(A) &= s_R^2 + b \cdot c \cdot n \cdot s_A^2, \\ MQ(B) &= s_R^2 + a \cdot c \cdot n \cdot s_B^2, \\ MQ(C) &= s_R^2 + a \cdot b \cdot n \cdot s_C^2, \\ MQ(AB) &= s_R^2 + c \cdot n \cdot s_{AB}^2, \\ MQ(AC) &= s_R^2 + b \cdot n \cdot s_{AC}^2, \\ MQ(BC) &= s_R^2 + a \cdot n \cdot s_{BC}^2, \\ MQ(ABC) &= s_R^2 + n \cdot s_{ABC}^2, \\ MQ(R) &= s_R^2. \end{aligned}$$

Die dadurch ermittelten s^2 können als prozentuale Anteile an der Gesamtvarianz angegeben werden:

$$s_A^2 + s_B^2 + s_C^2 + s_{AB}^2 + s_{AC}^2 + s_{BC}^2 + s_{ABC}^2 + s_R^2,$$

mit der Bedingung: $s_{(T_0)}^2 \hat{=} 100 \%$.

Die Gleichungen für die Varianzanalyse der zweifachen bzw. vierfachen Klassifikation ergeben ebenfalls sich aus den Gleichungen für die Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation durch Schluss von n auf $n-1$ bzw. $n+1$.

2.7.3 Einfache Varianzanalyse und modifizierter LSD-Test

Mit Hilfe einer einfachen Varianzanalyse lässt sich die Gleichheit der Mittelwerte mehrerer Stichprobengruppen überprüfen [19]. Die k Gruppen mit je n_i Stichprobenelementen und insgesamt n Elementen müssen normalverteilt sein und gleiche Varianzen aufweisen.

Für die einfache Varianzanalyse wird die Summe der Abweichungsquadrate der Stichprobenwerte um das Gesamtmittel (Q_{gesamt}) in zwei Anteile, die Summe der Abweichungsquadrate aller Einzelwerte x_{ij} um die Gruppenmittelwerte $\bar{x}_i$ ($Q_{\text{innerhalb}}$) und die Summe der Abweichungsquadrate der Gruppenmittelwerte $\bar{x}_i$ um das Gesamtmittel $\bar{x}$ (Q_{zwischen}), zerlegt.

Die zugehörigen Varianzen oder mittleren Quadrate (MQ) werden als Quotienten aus der Summe der Abweichungsquadrate und dem zugehörigen Freiheitsgrad ν berechnet:

$$MQ_{\text{zwischen}} = s_{\text{zw}}^2 = \frac{1}{\nu_1} \sum_i n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2,$$

$$MQ_{\text{innerhalb}} = s_{\text{in}}^2 = \frac{1}{\nu_2} \sum_{ij} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2,$$

mit $\nu_1 = k - 1$, $\nu_2 = n - k$.

MQ_{zwischen} wird als Stichprobenfehler und $MQ_{\text{innerhalb}}$ als Versuchsfehler bezeichnet.

Entstammen alle Gruppen einer Grundgesamtheit, dann sollten die Varianzen MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ etwa gleich groß sein. Ist aber der Quotient aus MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ größer als der kritische Wert der F-Verteilung, so befinden sich unter den Gruppen solche mit unterschiedlichen Mittelwerten μ_i . Die Null-Hypothese, alle Mittelwerte seien gleich:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i = \dots = \mu_k = \mu_n$$

wird somit anhand der Prüfgröße

$$\hat{F} = \frac{MQ_{\text{zwischen}}}{MQ_{\text{innerhalb}}},$$

$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

abgelehnt, wenn bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ $\hat{F} > F(v_1; v_2; \alpha)$ ist.

In diesem Fall sind mindestens zwei Mittelwerte μ_i voneinander verschieden und die Alternativhypothese $\mu_i \neq \mu$ wird für bestimmte i akzeptiert. Die Ablehnung der Null-Hypothese lässt jedoch nicht den Schluss zu, dass alle Mittelwerte signifikant voneinander verschieden sind. Es ist also herauszufinden, welche Mittelwerte oder welche Gruppen von Mittelwerten sich unterscheiden.

Ein multipler Mittelwertvergleich mit Hilfe des modifizierten LSD-Tests gibt darüber Auskunft, welche Mittelwerte zu homogenen Gruppen zusammengefasst werden können, das heißt, der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Dazu werden die k Mittelwerte der Größe nach absteigend geordnet und es wird geprüft, ob benachbarte Mittelwerte eine größere Differenz Δ aufweisen als die kleinste signifikante Differenz (least significant difference = LSD).

Die kleinste signifikante Differenz berechnet sich bei gleichen Stichprobenumfängen einer Messreihe zu:

$$LSD = t_{n-k, \alpha} \cdot \sqrt{\frac{2}{n_i} \cdot MQ_{\text{innerhalb}}},$$

mit t = Schwellenwert der t-Verteilung bei der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$,

n_i = Stichprobenumfang einer Messreihe,

$MQ_{\text{innerhalb}}$ = Varianz der Einzelwerte um die Gruppenmittelwerte.

Bei ungleichen Stichprobenumfängen gilt für die kleinste signifikante Differenz benachbarter Mittelwerte:

$$\text{LSD}_{(a,b)} = t_{n-k, \alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_a + n_b}{n_a \cdot n_b} \right) \cdot \text{MQ}_{\text{innerhalb}}},$$

mit n_a, n_b = Stichprobenumfang der benachbarten Mittelwerte.

Wenn $\Delta \leq \text{LSD}$ ist, lässt sich die Hypothese der Gleichheit benachbarter Mittelwerte nicht ablehnen. Die Grenzen homogener Gruppen von Mittelwerten werden durch eine gemeinsame Linie unterstrichen.

Ist bei der Berechnung der einfachen Varianzanalyse mit nachgeschaltetem LSD-Test zwar ein signifikanter Unterschied der Mittelwerte festgestellt worden, aber lassen sich keine Grenzen homogener Gruppen ermitteln, befindet sich in der Auswertung ein entsprechender Hinweis.

3 Prüfergebnisse

3.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Für einen Teil der Voruntersuchungen wurden Asphalte verwendet, die nicht für die Hauptuntersuchungen zur Anwendung kamen. Im Laufe der Forschungsarbeit wurden die Asphaltarten dahingehend verändert wurden, S-Varianten zu verwenden, so dass die Vorversuche zum Teil noch mit den „alten“ Asphaltarten durchgeführt worden sind.

Für die Vorversuche zur Festlegung der optimalen Vorspritzmittelmenge wurden ausschließlich die Asphaltarten der Hauptuntersuchungen (S-Varianten, SMA 0/8 S und ABi 0/16 S, beide mit PmB 45 A) verwendet.

3.1.1 Temperierverfahren

Für die Herstellung der Asphaltssysteme musste eine Temperiermethode gefunden werden, um die im Wärmeschrank temperierten Blecheimer mit der für eine Probeplatte eingewogenen Menge Asphalt in kurzer Zeit auf ein immer gleiches Temperaturniveau zu bringen. Auch musste sichergestellt sein, dass innerhalb des Mischguteimers der Asphalt eine homogene Temperaturverteilung aufwies.

Dazu wurden innerhalb des Mischguteimers sechs Temperaturfühler an unterschiedlichen Stellen eingesetzt und das Mischgut mit unterschiedlichen Temperaturverläufen temperiert. Anhand der Ergebnisse wurde ein Temperierverfahren festgelegt, mit dem die eingewogene Menge Mischgut innerhalb von 3 Stunden auf eine Temperatur von 137 °C temperiert wurde, ohne das Mischgut homogenisieren zu müssen.

Temperierverfahren:

- Temperatur des Asphaltes nach Probeteilung: ca. 80 °C
- Temperierung: 2,5 Stunden bei 160 °C
- Temperierung: 0,5 Stunden bei 137 °C
- Herstellung der Probeplatten

Mit diesem Temperierverfahren wurden mehrere Vorversuche durchgeführt um sicherzustellen, dass der Asphalt eine nahezu homogene Temperatur von 137 °C und – auch während der Temperierphase – an keiner Stelle eine höhere Temperatur von 145 °C aufweist.

Für das Herstellverfahren Heiß-auf-warm wurden Vorversuche zur Prüfung der notwendigen Abkühldauer durchgeführt, um eine konstante Oberflächentemperatur der Asphaltbinderprobeplatten von ca. 80 °C zu erreichen. Die Asphaltbinderprobeplatten wurden innerhalb des Walzsektor-Verdichtungsgerätes und ausgebaut bei Zimmertemperatur abgekühlt. Während des Abkühlvorganges wurde regelmäßig die Oberflächentemperatur gemessen.

Anhand der Ergebnisse wurde für die Variante Heiß-auf-warm festgelegt, die Asphaltbinderplatte nach dem Abschluss der Verdichtung 30 bis 40 Minuten in dem Walzsektor-Verdichtungsgerät abkühlen zu lassen und anschließend den Deckschichtasphalt aufzubringen. Mit diesem Verfahren konnte eine nahezu konstante Oberflächentemperatur von 80 °C bis 90 °C auf den Asphaltbinderprobeplatten realisiert werden.

3.1.2 Verdichtungsverhalten der Asphalte im Schichtensystem

Das Verhalten von mehreren Asphaltschichten bei der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerät wurde bislang nicht untersucht. Insbesondere die gleichzeitige Verdichtung von Asphaltbinder und Deckschichtasphalt bei den Herstellungsverfahren Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm musste vorab untersucht werden, um eine praxisadäquate Verdichtung gewährleisten zu können. Auf Grund der Änderung der Asphaltarten im Laufe des Forschungsprogramms in S-Varianten wurden für diese Voruntersuchungen teilweise Asphaltarten verwendet, die nicht für die Hauptuntersuchungen vorgesehen waren. Die Kontrolle der Verdichtung in den Hauptuntersuchungen zeigte aber, dass sich die hier gewonnenen Ergebnisse auf die S-Varianten der Asphalte problemlos übertragen ließen.

Zur Beurteilung der Verdichtungseigenschaften wurde von den verwendeten Asphaltarten der Verdichtungswiderstand D bestimmt. Kleinere Werte für D stehen für leichter

verdichtbare, größere Werte für D für schwerer verdichtbare Asphalte. In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse der Verdichtungsversuche für alle drei verwendeten Asphalte zusammengestellt.

Tabelle 3.1 Verdichtungswiderstand D

D	Dim.	AB 0/11 S	SMA 0/8 S	ABi 0/16 S
x ₁	21 Nm	37,2	47,9	41,9
x ₂	21 Nm	34,4	44,5	36,8
x ₃	21 Nm	38,1	44,7	40,5
x ₄	21 Nm	35,1	-	38,5
x ₅	21 Nm	31,2	-	36,7
$\bar{x}$	21 Nm	35,2	45,7	38,9
S	-	2,6954	1,9079	2,3039

An den Ergebnissen der Verdichtungsversuche kann festgestellt werden, dass der verwendete Splittmastixasphalt 0/8 S von den drei Asphalten der am schwersten zu verdichtende ist – auch schwerer verdichtbar, als der Asphaltbinder. Demnach kann im Schichtsystem bei gleichzeitiger Verdichtung beider Asphalte (Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm) erwartet werden, dass der ABi 0/16 S besser verdichtet wird, als der SMA 0/11 S. Der Asphaltbeton 0/11 S kann hier im Vergleich als der am leichtesten zu verdichtende bezeichnet werden kann – wobei anzumerken ist, dass der hier zur Anwendung kommende AB 0/ 11 S für einen Asphaltbeton als vergleichsweise schwer verdichtbar bezeichnet werden muss.

Mit den Asphalten wurden Probeplatten unter Variation der Walzübergänge im Walz-sektor-Verdichtungsgerät hergestellt, um die optimale Überrollungszahl für den angestrebten Verdichtungsgrad von $k = 100 \%$ festzulegen.

Diese Untersuchungen zu den Verdichtungseigenschaften wurden zu einem frühen Zeitpunkt während der Bearbeitung des Forschungsprojektes durchgeführt, so dass lediglich das Asphaltbetonmischgut 0/11 S dem Mischgut der Hauptuntersuchungen entsprach.

In Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse der Verdichtungsversuche zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.2 Ergebnisse der Versuchsverdichtungen (alte Asphaltarten: ABi 0/16 und SMA 0/8)

Anzahl der Überrollungen im WSV	Verdichtungsgrad [%]		
	ABi 0/16	SMA 0/8	AB 0/11 S
8/8/8	99,1	96,7	96,4
10/10/10	100,3	98,7	97,4
12/12/12	100,2	98,6	98,3
14/14/14	100,6	99,3	98,9
16/16/16	-	99,7	99,5
18/18/18	-	-	100,0

Zur Prüfung des Verdichtungsverhaltens des Schichtensystems wurde beispielhaft am System Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 – Heiß-auf-heiß – das Verdichtungsregime dahingehend verändert, vergleichbare Verdichtungsgrade in beiden Asphaltsschichten zu erreichen, die bei der Variante Heiß-auf-kalt gemessen wurden. Als Ausgangspunkt der Optimierung wurde die Überrollungszahl 16/16/16 festgelegt. Die Variationen sowie die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 3.3. dargestellt.

Tabelle 3.3 Verdichtungsverhalten der Schichtensysteme (alte Asphaltart: ABi 0/16)

Anzahl Überrollungen	Maximal- kraft	Asphaltbeton 0/11 S		Asphaltbinder 0/16	
		H _{bit} [Vol.-%]	k [%]	H _{bit} [Vol.-%]	k [%]
Heiß-auf-heiß					
16/16/16	12 kN	6,8	96,9	6,4	99,9
20/20/20	12 kN	5,4	98,3	5,9	100,4
16/16/16	15 kN	6,2	97,5	5,8	100,6
Heiß-auf-warm					
16/16/16	15 kN	5,8	98,0	4,9	101,5
Heiß-auf-kalt					
16/16/16	15 kN	4,7	99,0	6,5	100,0

Anhand der Ergebnisse der Verdichtungsversuche wurde vom betreuenden Gremium festgelegt, für alle Systemvarianten das gleiche Verdichtungsregime zu verwenden – eventuelle Abweichungen hinsichtlich Verdichtungsgrad gelten dann als Systemverhalten. Dabei muss aber immer gewährleistet sein, dass jede Schicht einen Verdichtungsgrad von $> 97,0 \%$ erreicht. Als Verdichtungsregime wurde die Überrollungszahl auf 16/16/16 bei einer Maximalkraft von 15 kN zur Herstellung der Systeme festgelegt.

Die Überprüfung des geforderten Verdichtungsgrades erfolgt an den für die Hauptuntersuchungen vorgesehenen Schichtensystemen unter Verwendung der vorgesehenen S-Asphaltvarianten im Rahmen der Prüfung der Hohlraumverhältnisse (vgl. Kapitel 3.2).

3.1.3 Optimierung der Prüfbedingungen des Spurbildungsversuchs

Für die Prüfung von Asphaltssystemen – bestehend aus Deck- und Binderschicht – im Spurbildungsversuch lagen bisher keine Erfahrungswerte hinsichtlich der zu verwendenden Prüfbedingungen vor.

Um Hinweise auf sinnvolle Prüfbedingungen zu erhalten, wurden vorab Tastversuche mit einem Asphaltsystem SMA 0/8 S (50/70) auf ABi 0/16 – Herstellverfahren Heiß-auf-heiß – durchgeführt. Anzumerken ist, dass sowohl das Asphaltbindermischgut sowie der Splittmastixasphalt dieser Untersuchungen nicht den in den fortlaufenden Untersuchungen verwendeten Asphalten entsprach.

Für die Optimierung wurden die Prüfbedingungen Stahlrad / Gummirad sowie das Belastungsgewicht variiert. Zur Erhöhung des Belastungsgewichtes wurde die doppelte Anzahl der üblichen Lastgewichte an der Prüfeinrichtung befestigt. Die damit erreichte Belastung erhöhte sich (rechnerisch) um 486 N von 692 N (Belastung gemäß TP A-StB) auf 1178 N. Trotz der Verdoppelung der Lastgewichte wurde eine Erhöhung des Prüfgewichtes nur um ca. 70 % erreicht. Die Ursache dafür liegt nicht nur in der zum Prüfgewicht gehörenden Eigenlast des Prüfrades und der Lastaufnahme-traverse, sondern auch am gerätetechnisch begrenzten Raumangebot, wonach sich der effektive Hebelarm der Lastgewichte um ca. 5 mm verkürzte. Die Er-

gebnisse der Tastversuche mit 692 N und 1178 N Belastung unter Variation der Art des Prüfrades sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4 Spurrinnentiefe des Asphaltsystems
SMA 0/8 S (50/70) auf ABi 0/16 - Heiß-auf-heiß
– alte Asphaltarten –

	Dim.	3 Lastgewichte (692 N)		6 Lastgewichte (1178 N)	
		Gummirad	Stahlrad	Gummirad	Stahlrad
x_1	[mm]	2,63	3,86	4,84	25,60
x_2	[mm]	2,50	4,06	4,37	23,96
x_3	[mm]	2,61	-	4,03	-
$\bar{x}$	[mm]	2,58	3,96	4,41	24,78
s	[-]	0,0700	0,1414	0,4067	1,1597

Anhand dieser Ergebnisse wurde von dem betreuenden Gremium die Prüfung mit den Prüfbedingungen Gummirad im Luftbad favorisiert. Ebenfalls sollte die TP A-StB konforme Prüftemperatur von $T = 50^\circ\text{C}$ nicht geändert werden. In weiteren Optimierungsversuchen sollte aber die Prüflast nochmals erhöht werden.

Dazu wurden Sondergewichte beschafft, die statt der üblichen Prüfgewichte direkt auf den Lastarm montiert werden konnten. Auf Grund der Größe der Sondergewichte war in dem für zwei zeitgleich durchführbare Versuche ausgelegten Spurbildungsgerät lediglich nur noch ein Versuch möglich, so dass sich die Gesamtdauer der Prüfungen verdoppelt. Mit den Sondergewichten wurde eine rechnerische Last von ca. 1600 N erreicht – somit um den Faktor 2,29 höher, als die TP konforme Prüflast von 700 N. Zusätzlich wurde die Prüftemperatur auf $T = 60^\circ\text{C}$ erhöht, um festzustellen, ob bei dieser Prüftemperatur eine bessere Spreizung der Ergebnisse zu erwarten ist.

Die Versuche der Tabelle 3.5 wurden mit den in der Forschungsarbeit vorgesehenen S-Varianten (mit PmB 45 A) der Asphalte SMA und ABi durchgeführt.

Tabelle 3.5 Spurrinnentiefen bei Variation der Lastgewichte und der Prüftemperatur
SMA 0/8 S (PmB), AB 0/11 S, ABi 0/16 S (PmB)
– neue Asphaltarten –

System	Dim.	6 Lastgewichte (1178 N)	Sondergewichte (1600 N)	
		T = 50 °C	T = 50 °C	T = 60 °C
A10, AB / ABi, Heiß-auf-kalt, ohne Vorspritzmittel	[mm]	3,12	4,70 6,25 6,74	> 30,0
A30, AB / ABi, Heiß-auf-heiß	[mm]	3,24	4,34 5,00	-
S10, SMA / ABi, Heiß-auf-kalt, ohne Vorspritzmittel	[mm]	-	2,70 3,14	3,71 5,21
S30, SMA / ABi, Heiß-auf-heiß	[mm]	-	3,17 2,77 3,16	4,32 4,40

Die Auswahl der Asphaltssysteme für die Voruntersuchungen erfolgte nach dem mutmaßlich verformungsresistentesten – Heiß-auf-heiß – sowie nach dem verformungsanfälligstem System – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel – mit beiden Deckschichtasphalten. Anhand der Ergebnisse der Optimierungsversuche wurden die Versuchsbedingungen zur Durchführung der Spurbildungsversuche festgelegt:

Für alle Varianten:

- Gummirad im Luftbad
- Belastung: Sondergewichte, 1600 N
- Prüftemperatur: T = 50 °C
- Spurrinnentiefe nach 20.000 Überrollungen [mm]

Die höhere Prüftemperatur von T = 60 °C für das System SMA auf ABi wurde nicht verwendet, da sich anhand der Vorversuche gezeigt hat, dass zwar größere Spurrinnentiefen gemessen wurden, sich aber eine bessere Spreizung der Ergebnisse nicht einstellt. Ebenfalls wäre durch die Verwendung unterschiedlicher Prüfbedingungen die Vergleichbarkeit der beiden Systeme nicht gegeben.

3.1.4 Einfluss der Schichtdicken auf das Verformungsverhalten

3.1.4.1 Einfluss der Deckschichtdicke

Die Asphaltssysteme wurden mit zwei unterschiedlichen Deckschichtdicken hergestellt. Für die Herstellung Heiß-auf-kalt wurde eine übliche Deckschicht mit 40 mm Dicke verwendet. Die Varianten mit dem Verfahren Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm wurden mit einer reduzierten Deckschichtdicke von 25 mm hergestellt.

Anhand von Vorversuchen wurde mittels Spurbildungsversuch am Beispiel des Splittmastixasphalt 0/8 (alte Asphaltart) untersucht, ob die Reduzierung der Schichtdicke einen messbaren Einfluss auf die Spurrinnentiefe ausübt. In Tabelle 3.6 sind die Ergebnisse der Spurbildungsversuche unter Variation der Probeplattendicke dargestellt.

Tabelle 3.6 Einfluss der Dicke der Probeplatten auf die Spurrinnentiefe (SMA 0/8)

Spurrinnentiefe		Dicke der Probeplatte SMA 0/8 (alte Asphaltart)		
		20 mm	40 mm	90 mm
x_1	[mm]	1,43	1,64	3,17
x_2	[mm]	1,87	1,78	3,30
x_3	[mm]	1,58	1,66	2,99
$\bar{x}$	[mm]	1,63	1,69	3,15
s	-	0,2237	0,0757	0,1557

Bei der Betrachtung der Spurrinnentiefen der Splittmastixprobeplatten mit der Dicke 20 mm und 40 mm kann festgestellt werden, dass die Änderung der Plattendicke bei diesem Dickeniveau keinen messbaren Einfluss auf die Ergebnisse der Spurbildungsversuche ausübt.

Bei einer Dicke von 90 mm kann ein statistisch signifikanter Einfluss auf die Spurrinnentiefe festgestellt werden. Eine Deckschichtdicke von 90 mm ist aber weder praxisrelevant noch wird diese Dicke im Forschungsvorhaben verwendet – diese zusätzliche Variante diente lediglich der Beantwortung der Fragestellung, ob mit den Versuchsbedingungen Gummirad im Luftbad ein signifikanter Einfluss prinzipiell messbar ist.

In Abbildung 3.1 ist das Ergebnis eines einfachen Mittelwertvergleichs dargestellt, der die Mittelwerte der Spurrinnentiefe der 20 und 40 mm dicken Probplatten als statistisch gleich beurteilt. Der Einfluss der Dicke der Deckschicht zwischen 20 und 40 mm auf die Ergebnisse des Spurbildungsversuchs kann demnach vernachlässigt werden. Streng genommen gilt dies aber nur für den geprüften Splittmastixasphalt.

```

Mittelwertvergleich für das Merkmal : SMA 20 mm / 40 mm
-----
Mittelwert der ersten Gruppe = 1.6267
Standardabweichung der ersten Gruppe = 0.2237
-----
Mittelwert der zweiten Gruppe = 1.6933
Standardabweichung der zweiten Gruppe = 0.0757
-----
F-Wert berechnet = 8.7267
FG1 = 2.0000
FG2 = 2.0000
F-Wert der F-Verteilung = 19.0000
-----
==> Die Varianzen sind gleich
-----
T-Wert berechnet = 0.4890
FG = 4.0000
T-Wert der T-Verteilung = 2.7760
-----
==> Die Mittelwerte sind gleich

```

Abbildung 3.1 Ergebnisse des einfachen Mittelwertvergleichs der Spurrinnentiefe, Plattendicke 20 mm und 40 mm

3.1.4.2 Einfluss der Dicke des Gesamtsystems

Die Variante Heiß-auf-kalt wurden im Vergleich zu den Varianten Heiß-auf-warm und Heiß-auf-heiß mit einer Deckschichtdicke von 40 mm bei gleicher Binderschichtdicke von 50 mm hergestellt. Damit weisen die Kompaktasphaltvarianten mit ihrer Deckschichtdicke von 25 mm bei gleichbleibender Asphaltbinderschichtdicke von 50 mm eine um 15 mm geringere Systemdicke auf.

Zur Untersuchung des Einflusses der Systemdicke auf die Ergebnisse des Spurbildungsversuchs wurde die Variante Heiß-auf-heiß mit einer angepassten Binderschichtdicke (65 mm) hergestellt, um mit den Varianten Heiß-auf-kalt gleiche Systemdicken zu erreichen. Diese „dickeren“ Systeme wurden mit beiden Deckschichtasphalten hergestellt, mittels Spurbildungsversuch geprüft und den Varianten mit geringerer Systemdicke vergleichend in Abbildung 3.2 gegenübergestellt. Abbildung 3.3

zeigt den Verlauf der Spurrinnentiefe über die Anzahl der Überrollungen bei dem Asphaltssystem Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S (unterschiedliche Dicke).

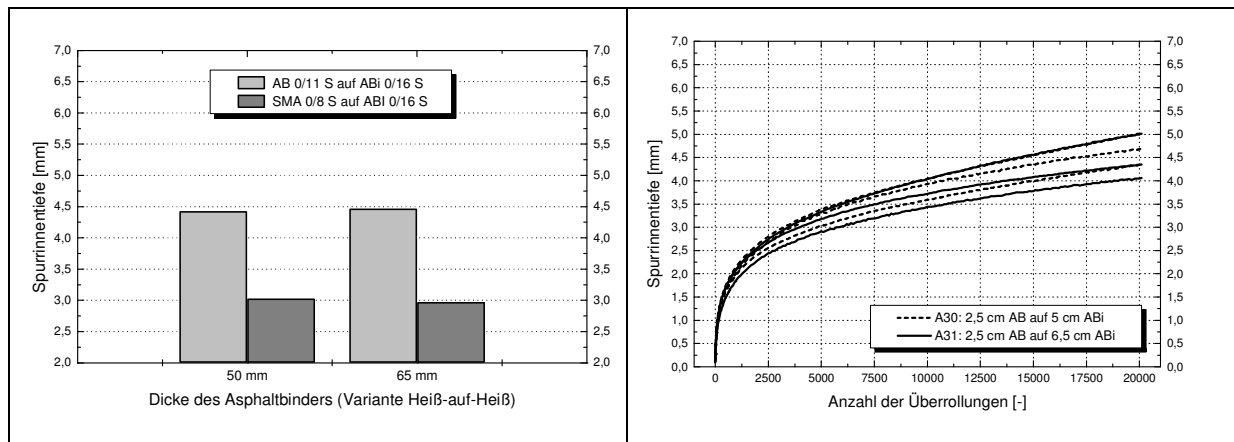


Abb. 3.2: Spurrinnentiefe an Asphaltssystemen unterschiedlicher Dicke

Abb. 3.3: Verlauf der Spurrinnentiefe AB 0/11 S auf ABi 0/16 S

Anhand der einfachen Mittelwertvergleiche kann festgestellt werden, dass die unterschiedlichen Dicken der Asphaltbinderschicht (50 mm und 65 mm) bei dem System Heiß-auf-heiß keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse des Spurbildungsversuchs ausüben. Sowohl beim Asphaltbeton 0/11 S als auch beim Splittmastixasphalt 0/8 S werden praktisch gleiche Spurrinnentiefen bei den verschiedenen Asphaltbinderdicken von 50 mm und 65 mm gemessen. Die Tabelle 3.7 zeigt die Einzelwerte der Spurrinnentiefen sowie die Ergebnisse der einfachen Mittelwertvergleiche.

Es kann demnach festgehalten werden, dass ein direkter Vergleich der Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm mit einer Systemdicke von 75 mm mit der Variante Heiß-auf-kalt mit einer Systemdicke von 90 mm trotz der unterschiedlichen Systemdicken zulässig ist.

Tabelle 3.7: Ergebnisse der Spurbildungsversuche sowie der einfachen Mittelwertvergleiche

System		AB 0/11 S auf ABi 0/16 S		SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S	
Asphaltbinderdicke		50 mm	65 mm	50 mm	65 mm
x_1	[mm]	4,68	5,01	3,16	2,86
x_2	[mm]	4,27	4,34	2,77	3,23
x_3	[mm]	4,34	4,05	3,17	2,83
$\bar{x}$	[mm]	4,43	4,47	3,03	2,97
S		0,2193	0,4924	0,2281	0,2228
Ergebnisse einfacher Mittelwertvergleiche		$\hat{F} = 5,0402 < 19,0$ $\rightarrow$ Varianzen sind gleich $\hat{t} = 0,1178 < 2,7760$ $\rightarrow$ Mittelwerte sind gleich		$\hat{F} = 1,0484 < 19,0$ $\rightarrow$ Varianzen sind gleich $\hat{t} = 0,3259 < 2,7760$ $\rightarrow$ Mittelwerte sind gleich	

3.1.5 Optimierung der Anspritzmenge

Für die durchzuführenden Hauptversuche zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften des Schichtenpaketes sowie des Schichtenverbundes wurde die Anspritzmenge der unterschiedlichen Anspritzmittel variiert und anhand der Ergebnisse der Versuche Schichtenverbund nach Leutner festgelegt.

Die Festlegung der Anspritzmenge erfolgte in Anlehnung an die Empfehlungen des Merkblattes für Schichtenverbund, Nähte, Anschlüsse und Randausbildung von Verkehrsflächen aus Asphalt - M SNAR.

Tabelle 3.8 Auszug aus Tabelle 1 und Tabelle 2 des M SNAR [6]

			aufzubringende Schicht				
			AB		SMA		
Art und Beschaffenheit der Unterlage	ABi	f	U 60 K 150 - 250	HK 150 - 250	U 60 K 150 - 250	HK 150 - 250	PmOB Art C U 60 K 150 - 250
		gf	U 60 K 250 - 350	HK 200 - 300	U 60 K 250 - 350	HK 250 - 350	PmOB Art C U 60 K 250 - 350
		o/a	U 60 K 300 - 400		U 60 K 250 - 350		PmOB Art C U 60 K 250 - 350
		s	HK 200 - 300		HK 200 - 300		-

f: frisch
gf: gefräst

o/a: sehr offenporig oder ausgemagert bzw. Kornausbruch
s: staubig

Auf Grund der labortechnischen Herstellung der Asphaltprobeplatten ist vor Aufbringen der Deckschicht von einer frischen Oberfläche auszugehen, so dass gemäß M SNAR für alle verwendeten Systemvarianten sowie Anspritzmittel eine Anspritzmenge von 150 bis 250 g/m² empfohlen wird. Für die Optimierungsversuche werden daher unterer und oberer Grenzwert dieser Empfehlung sowie die Menge von 350 g/m² festgelegt. Diese höhere Anspritzmenge wurde gewählt, um festzustellen, ob sich bereits hier ein zu dicker Bindemittelfilm als Gleitfilm ausbildet, der den Schichtenverbund ungünstig beeinflusst.

Die festgelegten Anspritzmengen beziehen sich auf die Menge der gesamten Emulsion bzw. des Haftklebers. Die nach dem Brechen bzw. Ablüften verbleibende, wirk-same Bindemittelmenge ist vom Wassergehalt der Emulsionen und vom Wasser- und Lösemittelgehalt des Haftklebers abhängig.

3.1.5.1 Haftkleber

Der Haftkleber wurde mit einer Pflanzensprühflasche auf die Asphaltbinderoberfläche aufgetragen. Die seitlichen Kanten der Asphaltbinderplatte wurden abgedeckt, so dass ausschließlich die Plattenoberfläche benetzt wurde. Die Anspritzmenge wurde

durch Wiegen der Asphaltbinderplatte kontrolliert. In Tabelle 3.9 sind die wirksamen Bitumenmengen des Haftklebers in Abhängigkeit der aufgetragenen Anspritzmenge vor und nach dem Ablüften zusammengestellt.

Tabelle 3.9 Wirksame Bindemittelmenge, Haftkleber

Haftkleber	Dim.	Wassergehalt: 57,8 %		
Anspritzmenge	[g/m ²]	150	250	350
Menge je Probeplatte	[g]	9,6	16,0	22,4
wirksame Bitumenmenge	[g/m ²]	63,3	105,5	147,7
Menge je Probeplatte	[g]	4,1	6,8	9,5

3.1.5.2 Bitumenemulsion U 60 K

Die Bitumenemulsion U 60 K wurde mit einer Schaumstoffrolle auf die Asphaltbinderoberfläche aufgetragen. Durch das Aufrollen und Andrücken der Farbrolle wurden auch die Vertiefungen der Asphaltoberfläche mit der Emulsion benetzt. Die aufgetragene Emulsionsmenge wurde durch Wiegen der Asphaltbinderplatte kontrolliert. In Tabelle 3.10 sind die wirksamen Bitumenmengen der Bitumenemulsion U 60 K in Abhängigkeit der aufgetragenen Anspritzmenge vor und nach dem Ablüften zusammengestellt.

Tabelle 3.10 Wirksame Bindemittelmenge, U 60 K

U 60 K	Dim.	Wassergehalt: 39,0 %		
Anspritzmenge	[g/m ²]	150	250	350
Menge je Probeplatte	[g]	9,6	16,0	22,4
wirksame Bitumenmenge	[g/m ²]	91,5	152,5	213,5
Menge je Probeplatte	[g]	5,9	9,8	13,7

3.1.5.3 Polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 (gemäß TL PmOB)

Die Bitumenemulsion U 60 K - C2 gemäß TL PmOB wurde mit dem gleichen Verfahren aufgetragen wie die Emulsion U 60 K. Auch hier wurde eine vollständige Benetzung der Asphaltoberfläche erreicht und die aufgetragene Emulsionsmenge durch

Wiegen der Asphaltbinderplatte kontrolliert. In Tabelle 3.11 sind die wirksamen Bitumenmengen der Bitumenemulsion U 60 K - C2 in Abhängigkeit der aufgetragenen Anspritzmenge vor und nach dem Ablüften zusammengestellt.

Tabelle 3.11 Wirksame Bindemittelmenge, U 60 K - C2

U 60 K - C2	Dim.	Wassergehalt : 39,3 %		
Anspritzmenge	[g/m ²]	150	250	350
Menge je Probeplatte	[g]	9,6	16,0	22,4
wirksame Bitumenmenge	[g/m ²]	91,1	151,8	212,5
Menge je Probeplatte	[g]	5,8	9,7	13,6

3.1.6 Ergebnisse der Optimierungsversuche

Als Beurteilungskriterium für die Festlegung der optimalen Anspritzmenge wurde die Prüfung Schichtenverbund nach Leutner durchgeführt. Die Optimierung der Anspritzmenge erfolgte ausschließlich an Asphaltssystemen, die mit unbewitterten (frischen) Asphaltbinderplatten hergestellt wurden. Den Ergebnissen liegt eine 3-fache Belegung der Prüfungen zu Grunde. Die Einzelwerte der Scherkraft und des Scherweges sind in Anlage 1 vollständig dokumentiert und in den Tabellen 3.12 und 3.13 sowie in den Abbildungen 3.4 bis 3.7 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.12 Zusammenstellung der Optimierungsergebnisse
Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S

System	Haftbrücke	Dosierung					
		150 g/m ²		250 g/m ²		350 g/m ²	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
AB 0/11S / ABi 0/16 S	Haftkleber	62,61	2,4	56,23	2,2	53,25	2,1
	U 60 K	57,12	2,5	51,09	2,6	48,45	2,2
	U 60 K C2	67,10	2,8	63,47	2,5	65,20	2,7

Tabelle 3.13 Zusammenstellung der Optimierungsergebnisse
Splittmastixasphalt 0/8 S auf Asphaltbinder 0/16 S

System	Haftbrücke	Dosierung					
		150 g/m ²		250 g/m ²		350 g/m ²	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
SMA 0/8S / ABi 0/16 S	Haftkleber	54,94	2,1	52,34	2,1	48,42	2,0
	U 60 K	56,60	2,2	57,01	2,5	55,12	2,5
	U 60 K C2	57,65	2,3	57,68	2,4	56,03	2,4

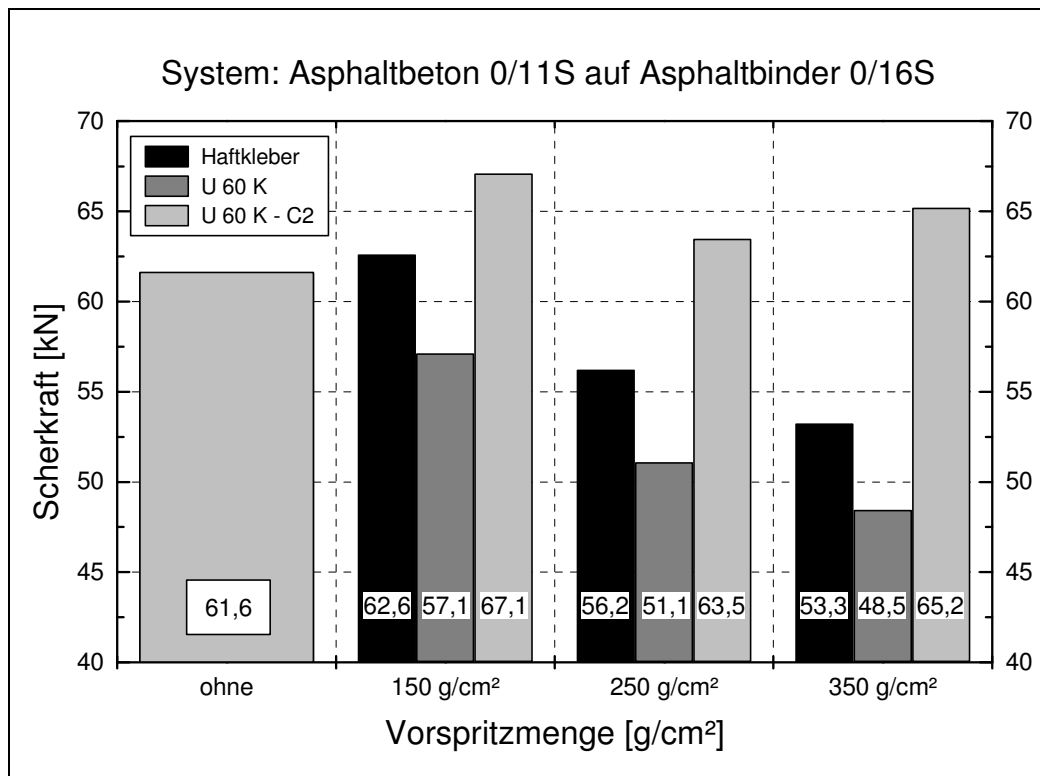


Abbildung 3.4: Schichtenverbund nach Leutner, AB 0/11 S auf ABi 0/16 S
- Optimierungsversuche – Darstellung der Scherkraft

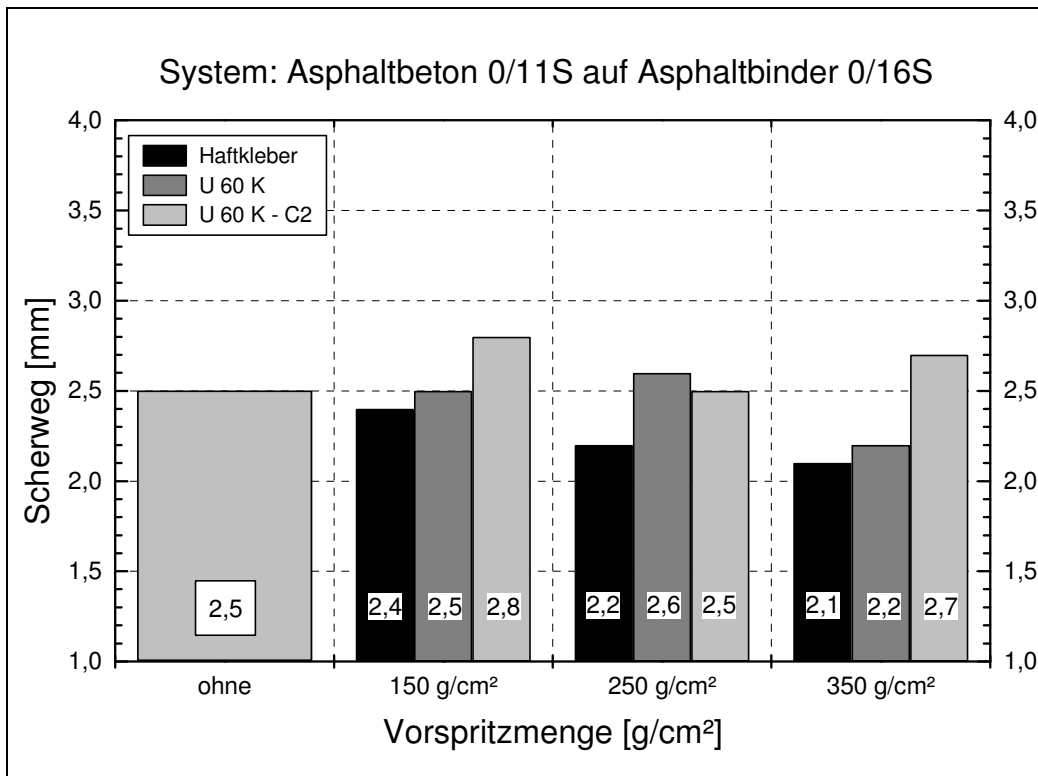


Abbildung 3.5: Schichtenverbund nach Leutner, AB 0/11 S auf ABi 0/16 S
- Optimierungsversuche – Darstellung des Scherweges

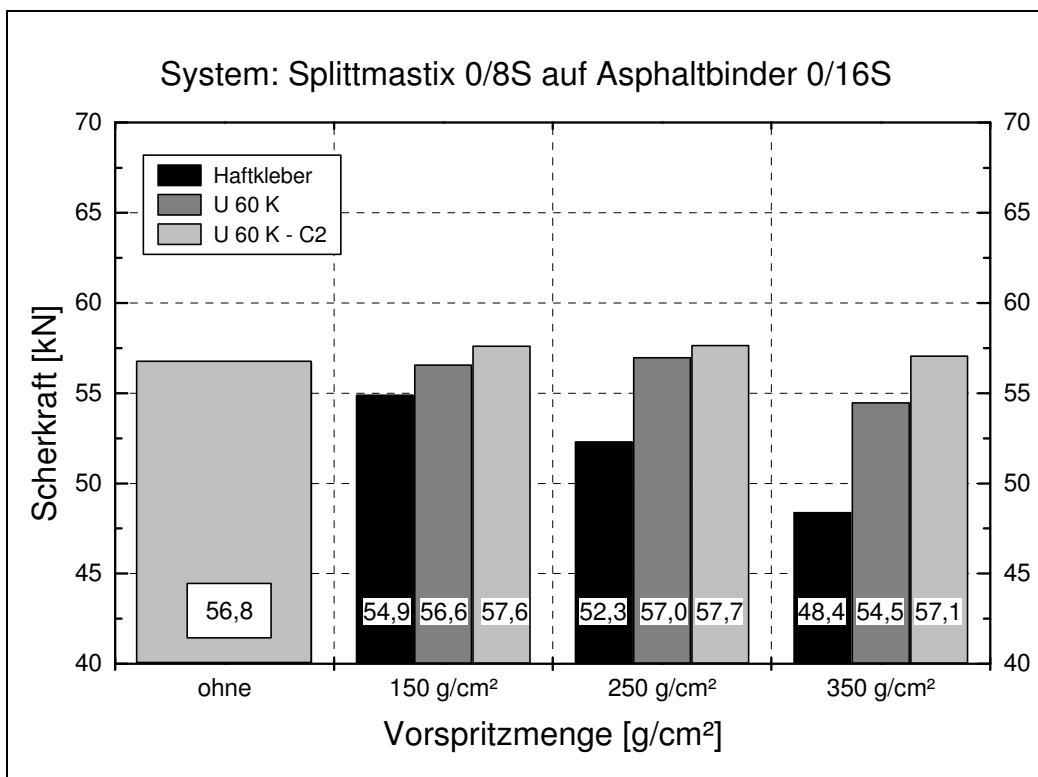


Abbildung 3.6: Schichtenverbund nach Leutner, SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S
- Optimierungsversuche – Darstellung der Scherkraft

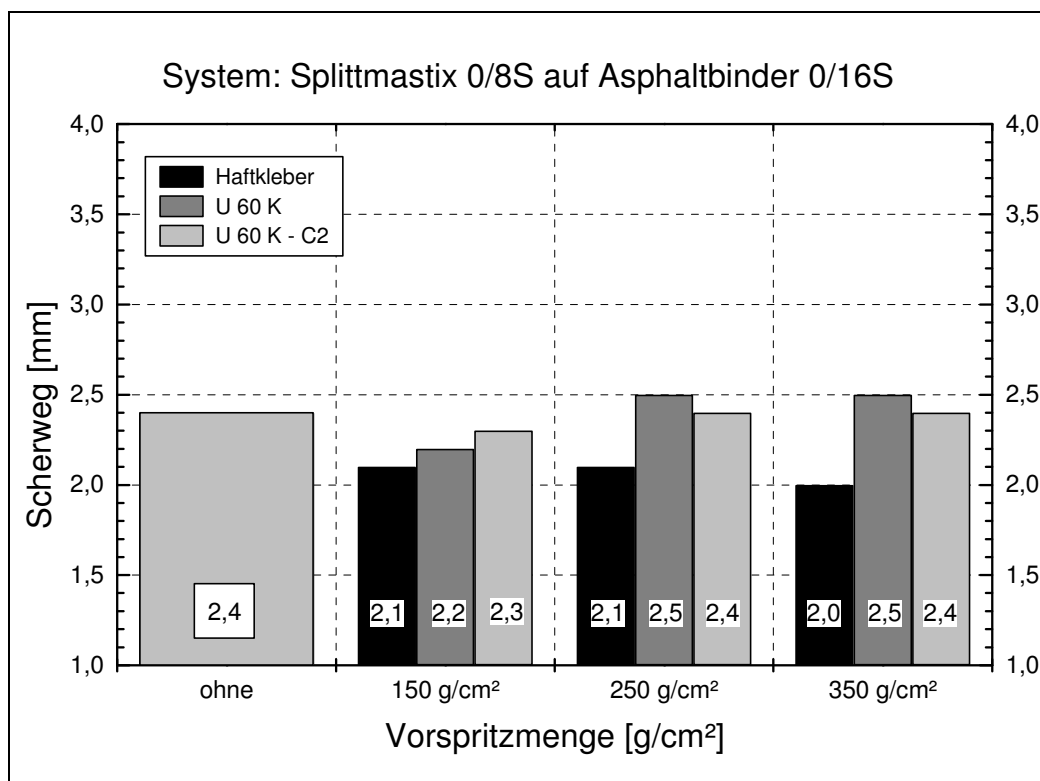


Abbildung 3.7: Schichtenverbund nach Leutner, SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S - Optimierungsversuche – Darstellung des Scherweges

System Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S (unbewittert):

Anhand der Prüfergebnisse kann festgestellt werden, dass die labortechnische Herstellung der Varianten Heiß-auf-kalt auch ohne Vorspritzmittel einen vergleichsweise guten Verbund gewährleistet. Durch die Verwendung von Haftkleber bei der geringsten verwendeten Dosierung (150 g/m²) wird eine Verbesserung des Verbundes erzielt, der bei ansteigender Vorspritzmenge ungünstiger wird.

Die Bitumenemulsion U 60 K wirkt sich ungünstig auf die Verbundwirkung aus. Alle untersuchten Vorspritzmengen erreichten nicht die Verbundwirkung, die ohne Vorspritzmittel gemessen wurde.

Lediglich die polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 gemäß PmOB verbessert die Verbundeigenschaften bei allen verwendeten Vorspritzmengen. Auffällig ist eine Verschlechterung der Verbundwirkung bei der Erhöhung der Anspritzmenge - insbesondere beim Haftkleber und bei der Bitumenemulsion U 60 K, die offenbar durch die Ausbildung eines Gleitfilms zwischen den Asphaltsschichten entsteht.

Unabhängig der aufgetragenen Vorspritzmenge kann eine Rangfolge der Scherkraft der Vorspritzmittel festgestellt werden: Die polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 erreicht die günstigste, der Haftkleber eine mittlere und die Bitumenemulsion U 60 K die ungünstigste Verbundwirkung.

System Splittmastixasphalt 0/8 S auf Asphaltbinder 0/16 S (unbewittert):

Auch das System mit Splittmastixasphalt erreicht bei der Variante Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel vergleichsweise hohe Scherkräfte. Lediglich bei der Verwendung der polymermodifizierten Bitumenemulsion U 60 K - C2 werden diese Scherkräfte noch übertroffen. Die Ausbildung eines Gleitfilms ist auch hier bei Erhöhung der Vorspritzmittelmenge zu erkennen – insbesondere beim Haftkleber.

Während beim Haftkleber mit Erhöhung der Anspritzmenge die Scherkraft geringer wird, ist bei den Emulsionen U 60 K und U 60 K - C2 bei den Vorspritzmengen 150 g/m² und 250 g/m² praktisch kein Unterschied festzustellen. Eine weitere Erhöhung der Anspritzmenge auf 350 g/m² wirkt sich dann ebenfalls ungünstig auf die Scherkräfte aus.

Anhand der Ergebnisse kann festgestellt werden:

- Die Erhöhung der Vorspritzmenge von 150 g/m² auf 350 g/m² wirkt sich ungünstig auf die Scherkraft aus,
- die polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 erzielt die günstigste Verbundwirkung – bei allen hier geprüften Schichtensystemen
- beim System AB 0/11 S auf ABi 0/16 S erreicht die Bitumenemulsion U 60 K, beim System SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S der Haftkleber die ungünstigste Verbundwirkung – unabhängig von der aufgetragenen Vorspritzmenge.

Für die weiteren Untersuchungen wird einheitlich für alle verwendeten Vorspritzmittel bei allen herzustellenden Systemen die Vorspritzmenge von 150 g/m² festgelegt.

3.2 Versuchsergebnisse zur Prüfung der Hohlraumverhältnisse

Zur Prüfung der Hohlraumverhältnisse wurden die Plattensysteme an der Schichtgrenze sowie in der Mitte der Binderschicht horizontal zerschnitten. Die drei Schicht-

horizonte wurden in jeweils 9 Einzelstücke zersägt und daran die relativen Raum-dichten bestimmt.

Die Abbildungen 3.8 zeigt die Lage der Schichthorizonte im Plattensystem, die Lage der Einzelstücke im Schichthorizont sowie die Größe der Einzelstücke.

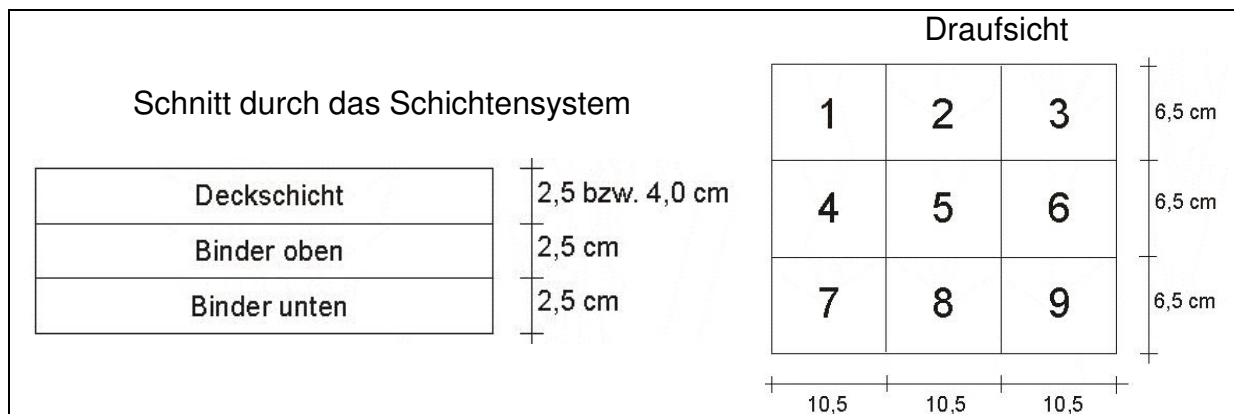


Abbildung 3.8 Lage, Bezeichnung und Größe der Einzelstücke im Schichtensystem

3.2.1 Hohlraumverhältnisse AB 0/11 S auf ABi 0/16 S

Die Ergebnisse der Hohlraum- und Verdichtungsverhältnisse sind als Aufsicht in den Abbildungen 3.9 bis 3.14 dargestellt.

Insgesamt kann zunächst festgestellt werden, dass der obere Horizont der Asphaltbinderschicht bei allen Varianten einen höheren Verdichtungsgrad aufweisen, als der Untere. Bei der Variante Heiß-auf-heiß ist dieser Unterschied am größten.

Asphaltbeton 0/11 S – Variante: Heiß-auf-kalt

k = 99,7 H _{bit} = 4,2	k = 100,3 H _{bit} = 3,6	k = 100,1 H _{bit} = 3,8
k = 100,1 H _{bit} = 3,8	k = 100,2 H _{bit} = 3,7	k = 99,9 H _{bit} = 4,0
k = 100,2 H _{bit} = 3,7	k = 100,1 H _{bit} = 3,8	k = 99,3 H _{bit} = 4,6

Hohlraumgehalt H_{bit} = 3,9 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 100,0 %

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Horizont

k = 101,8 H _{bit} = 2,7	k = 101,3 H _{bit} = 3,1	k = 100,1 H _{bit} = 4,2
k = 101,4 H _{bit} = 3,0	k = 102,8 H _{bit} = 1,8	k = 101,5 H _{bit} = 2,9
k = 100,3 H _{bit} = 4,1	k = 101,2 H _{bit} = 3,3	k = 101,1 H _{bit} = 3,3

Hohlraumgehalt H_{bit} = 3,2 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 101,3 %

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Horizont

k = 99,2 H _{bit} = 5,1	k = 101,4 H _{bit} = 3,1	k = 99,4 H _{bit} = 4,9
k = 99,7 H _{bit} = 4,7	k = 101,4 H _{bit} = 3,0	k = 100,4 H _{bit} = 4,0
k = 99,7 H _{bit} = 4,7	k = 99,6 H _{bit} = 4,8	k = 100,2 H _{bit} = 4,2

Hohlraumgehalt H_{bit} = 4,3 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 100,1 %

Abbildung 3.9 Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt, System
Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S, **Heiß-auf-kalt**

Bei der Optimierung der Verdichtung wurde bei den einzelnen Asphalten jeweils ein Verdichtungsgrad von k = 100 % angestrebt. Danach wurde dieses Verdichtungsregime für alle Systemvarianten gleich festgelegt. Anhand der Ergebnisse der Variante Heiß-auf-kalt kann festgestellt werden, dass der angestrebte Verdichtungsgrad beim Asphaltbeton zielgenau erreicht wurde. Beim Asphaltbinder wurde er im Mittel geringfügig (Δk ca. 0,7 %) überschritten.

Asphaltbeton 0/11 S – Variante: Heiß-auf-warm

k = 98,4 H _{bit} = 5,5	k = 97,9 H _{bit} = 6,0	k = 98,1 H _{bit} = 5,7
k = 97,7 H _{bit} = 6,1	k = 97,9 H _{bit} = 5,9	k = 99,2 H _{bit} = 4,7
k = 100,1 H _{bit} = 3,8	k = 98,8 H _{bit} = 5,0	k = 99,3 H _{bit} = 4,6

Hohlraumgehalt H_{bit} = 5,2 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 98,6 %

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Horizont

k = 102,8 H _{bit} = 1,7	k = 103,1 H _{bit} = 1,4	k = 102,3 H _{bit} = 2,2
k = 102,9 H _{bit} = 1,7	k = 102,5 H _{bit} = 2,0	k = 102,6 H _{bit} = 1,9
k = 102,5 H _{bit} = 1,9	k = 102,7 H _{bit} = 1,8	k = 103,3 H _{bit} = 1,2

Hohlraumgehalt H_{bit} = 1,7 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 102,8 %

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Horizont

k = 100,7 H _{bit} = 3,7	k = 102,3 H _{bit} = 2,2	k = 101,4 H _{bit} = 3,0
k = 101,5 H _{bit} = 3,0	k = 102,3 H _{bit} = 2,2	k = 101,0 H _{bit} = 3,4
k = 100,5 H _{bit} = 3,9	k = 102,1 H _{bit} = 2,4	k = 100,7 H _{bit} = 3,7

Hohlraumgehalt H_{bit} = 3,0 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 101,4 %

Abbildung 3.10 Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt, System
Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S, **Heiß-auf-warm**

Beim System Heiß-auf-warm ist eine bessere Verdichtung in der Binderschicht festzustellen, wobei der untere Schichthorizont des Asphaltbinders einen um 1,4 % geringeren Verdichtungsgrad aufweist, als der obere. Die Asphaltbeton-Deckschicht erreicht den angestrebten Verdichtungsgrad von 100 % nicht, liegt aber über den geforderten 97 %.

Asphaltbeton 0/11 S – Variante: Heiß-auf-heiß

k = 98,4 H _{bit} = 5,4	k = 97,4 H _{bit} = 6,4	k = 97,8 H _{bit} = 6,0
k = 97,7 H _{bit} = 6,1	k = 97,9 H _{bit} = 5,9	k = 97,8 H _{bit} = 6,0
k = 98,3 H _{bit} = 5,6	k = 98,0 H _{bit} = 5,9	k = 98,4 H _{bit} = 5,4

Hohlraumgehalt H_{bit} = 5,8 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 98,0 %

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Horizont

k = 101,5 H _{bit} = 3,0	k = 101,8 H _{bit} = 2,7	k = 100,9 H _{bit} = 3,6
k = 102,2 H _{bit} = 2,3	k = 102,9 H _{bit} = 1,6	k = 101,1 H _{bit} = 3,3
k = 100,8 H _{bit} = 3,7	k = 99,9 H _{bit} = 4,5	k = 101,5 H _{bit} = 2,9

Hohlraumgehalt H_{bit} = 3,1 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 101,4 %

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Horizont

k = 97,6 H _{bit} = 6,7	k = 99,0 H _{bit} = 5,4	k = 97,9 H _{bit} = 6,4
k = 96,8 H _{bit} = 7,5	k = 100,5 H _{bit} = 3,9	k = 97,7 H _{bit} = 6,6
k = 96,9 H _{bit} = 7,4	k = 99,4 H _{bit} = 5,0	k = 97,2 H _{bit} = 7,1

Hohlraumgehalt H_{bit} = 6,2 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 98,1 %

Abbildung 3.11 Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt, System
Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S, **Heiß-auf-heiß**

Auch bei dem Herstellungsverfahren Heiß-auf-heiß erreicht die Asphaltbeton-Deckschicht nicht den angestrebten Verdichtungsgrad von 100 %. Im Vergleich zum System Heiß-auf-warm werden hier beim Asphaltbinder deutlich geringere Verdichtungsgrade – sowohl im oberen, als auch im unteren Schichthorizont – erreicht.

3.2.2 Hohlraumverhältnisse SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S

Splittmastixasphalt 0/8 S – Variante: Heiß-auf-kalt

k = 99,7 H _{bit} = 4,3	k = 100,2 H _{bit} = 3,9	k = 99,1 H _{bit} = 5,0
k = 100,3 H _{bit} = 3,8	k = 100,8 H _{bit} = 3,3	k = 99,9 H _{bit} = 4,2
k = 99,9 H _{bit} = 4,2	k = 100,6 H _{bit} = 3,5	k = 99,2 H _{bit} = 4,8

Hohlraumgehalt H_{bit} = 4,1 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 99,9 %

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Horizont

k = 100,3 H _{bit} = 4,1	k = 100,9 H _{bit} = 3,5	k = 100,9 H _{bit} = 3,5
k = 100,4 H _{bit} = 4,0	k = 100,9 H _{bit} = 3,5	k = 101,1 H _{bit} = 3,3
k = 97,8 H _{bit} = 6,5	k = 100,3 H _{bit} = 4,1	k = 99,7 H _{bit} = 4,4

Hohlraumgehalt H_{bit} = 4,1 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 100,3 %

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Horizont

k = 100,1 H _{bit} = 4,2	k = 100,8 H _{bit} = 3,6	k = 99,7 H _{bit} = 4,7
k = 100,7 H _{bit} = 3,7	k = 100,8 H _{bit} = 3,6	k = 100,5 H _{bit} = 3,9
k = 99,1 H _{bit} = 5,2	k = 99,9 H _{bit} = 4,5	k = 100,3 H _{bit} = 4,1

Hohlraumgehalt H_{bit} = 4,2 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 100,2 %

Abbildung 3.12 Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt, System **Splittmastix-asphalt 0/8 S** auf Asphaltbinder 0/16 S, **Heiß-auf-kalt**

Bei dem System mit Splittmastix als Deckschichtasphalt wird bei der Variante Heiß-auf-kalt der angestrebte Verdichtungsgrad von 100 % sowohl im Asphaltbinder, als auch im Splittmastix zielgenau erreicht.

Splittmastixasphalt 0/8 S – Variante: Heiß-auf-warm

k = 95,4 H _{bit} = 8,5	k = 98,0 H _{bit} = 6,0	k = 96,9 H _{bit} = 7,0
k = 97,9 H _{bit} = 6,1	k = 97,5 H _{bit} = 6,5	k = 97,9 H _{bit} = 6,1
k = 99,5 H _{bit} = 4,6	k = 97,4 H _{bit} = 6,6	k = 97,3 H _{bit} = 6,7

Hohlraumgehalt H_{bit} = 6,5 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 97,5 %

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Horizont

k = 102,7 H _{bit} = 1,8	k = 102,4 H _{bit} = 2,1	k = 102,0 H _{bit} = 2,5
k = 102,9 H _{bit} = 1,6	k = 103,1 H _{bit} = 1,4	k = 103,0 H _{bit} = 1,5
k = 102,5 H _{bit} = 2,0	k = 102,5 H _{bit} = 2,0	k = 102,2 H _{bit} = 2,3

Hohlraumgehalt H_{bit} = 1,9 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 102,6 %

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Horizont

k = 100,6 H _{bit} = 3,8	k = 101,4 H _{bit} = 3,1	k = 103,2 H _{bit} = 1,4
k = 100,7 H _{bit} = 3,8	k = 102,3 H _{bit} = 2,2	k = 100,0 H _{bit} = 4,4
k = 100,5 H _{bit} = 3,9	k = 101,4 H _{bit} = 3,0	k = 100,8 H _{bit} = 3,6

Hohlraumgehalt H_{bit} = 3,2 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 101,2 %

Abbildung 3.13 Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt, System **Splittmastix-asphalt 0/8 S** auf Asphaltbinder 0/16 S, **Heiß-auf-warm**

Die Variante Heiß-auf-warm mit Splittmastixasphalt als Deckschicht zeigt eine vergleichbare Tendenz wie das System mit Asphaltbeton: Die Binderschicht weist im oberen Schichthorizont eine vergleichsweise hohe und im unteren Schichthorizont eine etwas geringere Verdichtung auf, die aber beide deutlich über den angestrebten 100 % liegen. Die Deckschicht dagegen ist mit 97,5 % vergleichsweise gering verdichtet, erfüllt aber den Anforderungswert von > 97,0 %.

Splittmastixasphalt 0/8 S – Variante: Heiß-auf-heiß

k = 98,5 H _{bit} = 5,5	k = 98,7 H _{bit} = 5,4	k = 98,0 H _{bit} = 6,0
k = 98,6 H _{bit} = 5,5	k = 98,1 H _{bit} = 6,0	k = 98,2 H _{bit} = 5,8
k = 99,0 H _{bit} = 5,1	k = 98,4 H _{bit} = 5,6	k = 98,6 H _{bit} = 5,4

Hohlraumgehalt H_{bit} = 5,6 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 98,4 %

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Horizont

k = 100,8 H _{bit} = 3,6	k = 102,9 H _{bit} = 1,6	k = 100,9 H _{bit} = 3,5
k = 101,9 H _{bit} = 2,6	k = 102,4 H _{bit} = 2,1	k = 101,8 H _{bit} = 2,7
k = 101,3 H _{bit} = 3,1	k = 101,8 H _{bit} = 2,6	k = 101,0 H _{bit} = 3,4

Hohlraumgehalt H_{bit} = 2,8 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 101,7 %

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Horizont

k = 98,2 H _{bit} = 6,1	k = 99,8 H _{bit} = 4,5	k = 97,1 H _{bit} = 7,1
k = 98,5 H _{bit} = 5,8	k = 99,4 H _{bit} = 5,0	k = 98,4 H _{bit} = 5,9
k = 94,9 H _{bit} = 9,3	k = 99,1 H _{bit} = 5,3	k = 97,1 H _{bit} = 7,1

Hohlraumgehalt H_{bit} = 6,2 Vol.-%
Verdichtungsgrad k = 98,1 %

Abbildung 3.14 Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt, System
Splittmastixasphalt 0/8 S auf Asphaltbinder 0/16 S, **Heiß-auf-heiß**

Die Asphaltbinderschicht erreicht bei der Varianten Heiß-auf-heiß mit Splittmastixasphalt als Deckschicht im Mittel den angestrebten Verdichtungsgrad. Innerhalb der Schicht ist aber ein nicht unerheblicher Unterschied zwischen oberem und unterem Schichthorizont festzustellen. Die Splittmastixasphalt-Deckschicht erfüllt die Anforderung von > 97,0 % und ist um etwa 1 % höher, als die Splittmastixasphalt-Deckschicht der Variante Heiß-auf-warm.

In der Abbildung 3.15 ist der Verdichtungsgrad der Asphaltsschichten der unterschiedlich hergestellten Asphaltssysteme grafisch gegenübergestellt.

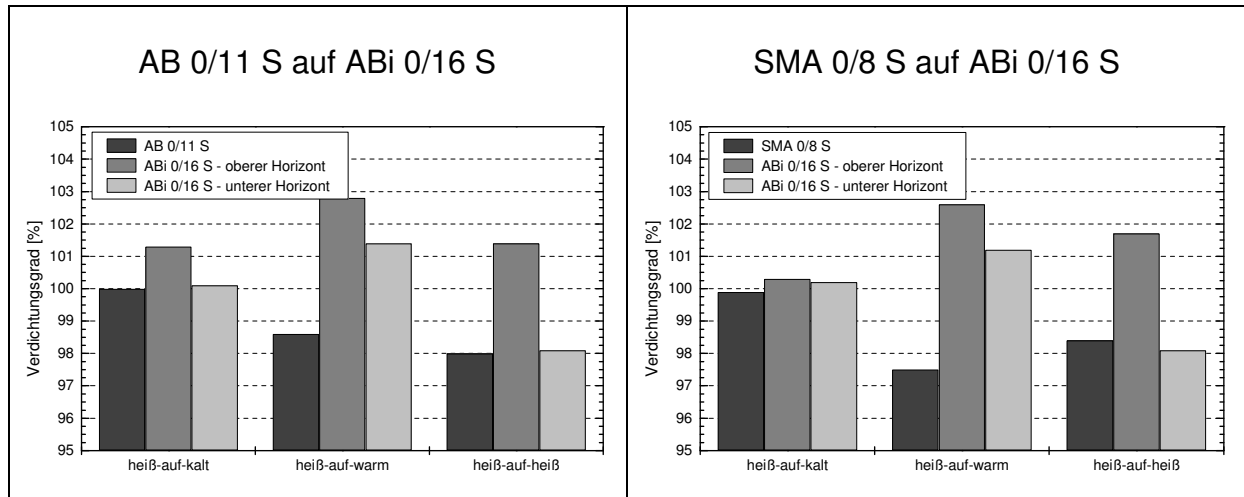


Abbildung 3.15 Verdichtungsgrad der Schichten im System

Sowohl bei den Systemen mit Splittmastixasphalt- als auch bei denen mit Asphaltbeton in der Deckschicht ist ein vergleichbarer Verlauf des Verdichtungszustandes im Asphaltbinder zu erkennen. Der obere Schichthorizont des Binders ist in allen Fällen am besten verdichtet, der untere ist beim Verfahren Heiß-auf-warm besser, beim Verfahren Heiß-auf-heiß schlechter verdichtet als beim Verfahren Heiß-auf-kalt.

Die bessere Verdichtung des Asphaltbinders beim Verfahren Heiß-auf-warm im Vergleich zu Heiß-auf-heiß kann damit erklärt werden, dass bei Heiß-auf-heiß lediglich weggeregelt vorverdichtet wird und im Anschluss Deck- und Binderschicht gemeinsam weg- und kraftgeregelt verdichtet werden, während beim Verfahren Heiß-auf-warm beide Schichten, sowohl Binder- als auch Deckschicht beide weg- und kraftgeregelt verdichtet werden.

Der geringere Verdichtungsgrad der Deckschicht bei den Verfahren Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm kann auf die „weiche“ Unterlage zurückgeführt werden. Offenbar verliert sich ein Teil der Verdichtungsenergie in die noch warme bzw. heiße Binderschicht. Als weitere Erklärungsmöglichkeit können die hin und wieder in der Praxis beobachteten Auflockerungserscheinungen angeführt werden, die in der Deckschicht

dann auftreten, wenn nach dem Erreichen eines optimalen Verdichtungszustandes weiter verdichtet wird.

3.3 Versuchsergebnisse zur Beurteilung des Schichtenverbundes

Für die Beurteilung des Verbundes zwischen der Binder- und der Deckschicht wurde der Schichtenverbund nach Leutner gemäß ALP-A Teil 4 „Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner“ sowie die Haftzugfestigkeit in Anlehnung an die ALP-A Teil 9 „Bestimmung der Haftzugfestigkeit von Dünnen Schichten im Heiß- und Kalteinbau“ geprüft. Die Ergebnisse der Prüfungen sind im Anhang III vollständig dokumentiert.

3.3.1 Schichtenverbund nach Leutner

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner an den unbeanspruchten Varianten, an den bewitterten Varianten sowie innerhalb der Schichten zusammenfassend dargestellt.

3.3.1.1 Unbeanspruchte Asphaltbinderoberfläche

Die Hauptversuche wurden an Systemen durchgeführt, die auf frischen – d.h. nicht verstaubten oder beanspruchten – Asphaltbinderoberflächen hergestellt wurden. In Abbildung 3.16 sind die Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner – maximale Abscherkraft in [kN] – dargestellt. Die Säulen zeigen das Ergebnis als Mittelwert von drei Einzelversuchen. Die Ergebnisse der Einzelversuche sind durch Punkte dargestellt.

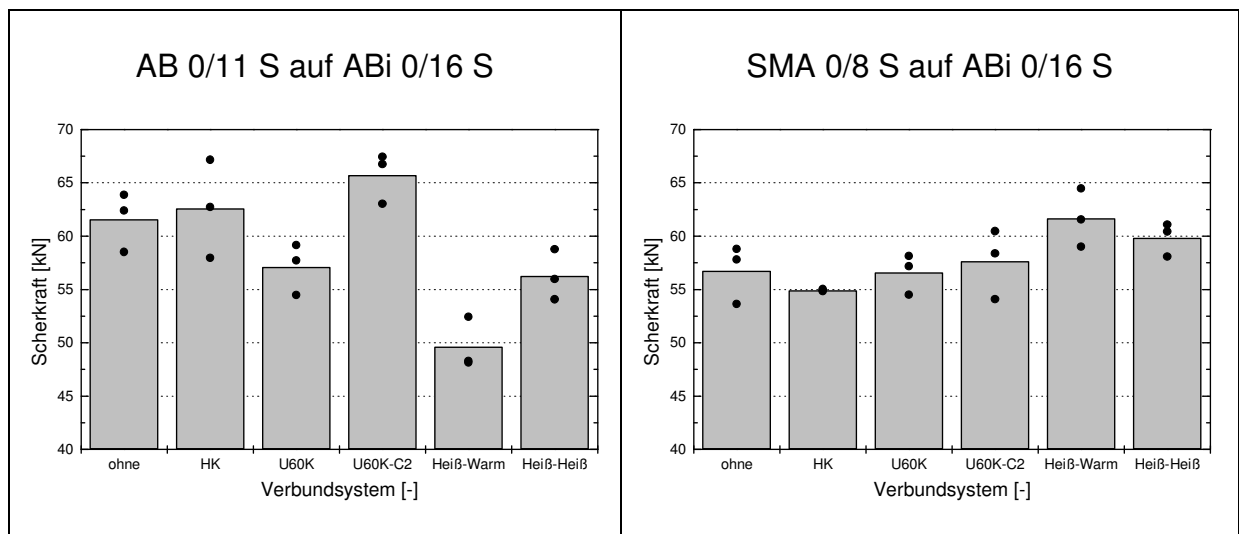


Abbildung 3.16 Schichtenverbund nach Leutner – Scherkraft [kN]

Zunächst muss festgestellt werden, dass die Variante HeiB-auf-kalt ohne Vorspritzmittel bei beiden Deckschichtvarianten nicht die kleinsten Scherkräfte liefert.

Beim Splittmastixasphalt hat das Vorspritzmittel praktisch keinen Einfluss auf die Scherkraft – der Haftkleber zeigt zwar im Mittel etwas geringere Werte, die PmB-Emulsion etwas höhere, auf Grund der Prüfstreuung müssen die Ergebnisse aber als gleichwertig bezeichnet werden.

Beim Asphaltbeton als Deckschicht sind deutlichere Unterschiede festzustellen: Bei der Verwendung von U 60 K wird die Scherkraft geringer, beim Haftkleber bleibt das Ergebnis praktisch gleich, bei Verwendung der polymermodifizierten Bitumenemulsion werden deutlich höhere Scherkräfte gemessen, als ohne Vorspritzmittel.

Die Varianten HeiB-auf-heiB und HeiB-auf-warm liefern beim Asphaltbeton geringere, beim Splittmastix größere Scherkräfte als die Variante HeiB-auf-kalt ohne Vorspritzmittel.

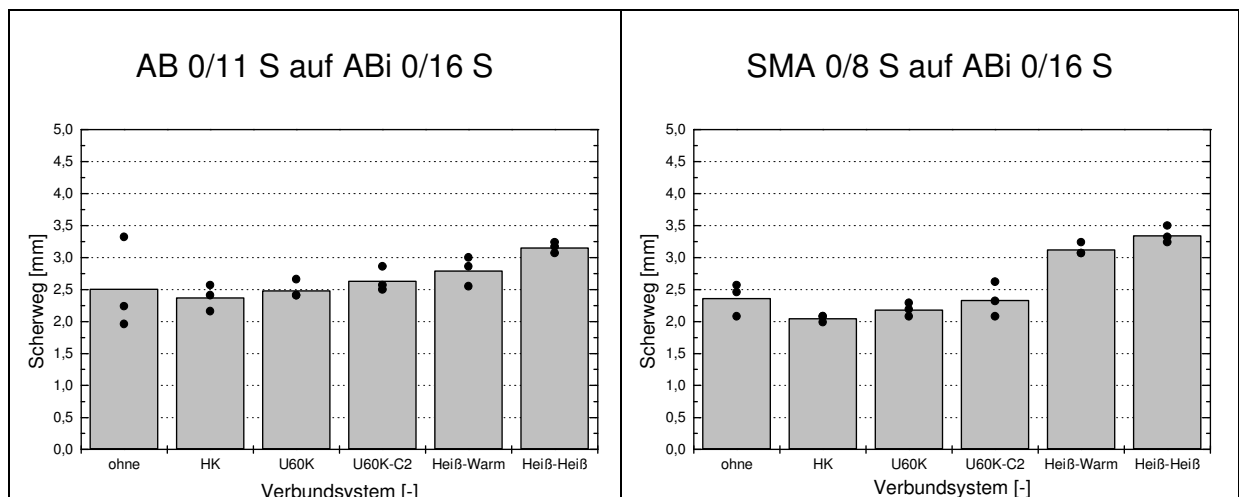


Abbildung 3.17 Schichtenverbund nach Leutner – Scherweg [mm]

In der Abbildung 3.17 sind die Scherwege als Ergebnis der Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner dargestellt. Bei beiden Deckschichtasphalten sind bei den Varianten Heiß-auf-kalt vergleichbare Ergebnisse gemessen worden, während das Vorspritzmittel Haftkleber tendenziell geringere Scherwege aufweist, zeigen die Varianten mit der PmB-Emulsion tendenziell größere Scherwege.

Die Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm erreichen die längsten Scherwege.

Um den Einfluss der Verdichtung auf das Prüfergebnis zu untersuchen, wurden die Bohrkernproben zusätzlich zur Schichtgrenze auch innerhalb der Deck- und der Binde-schicht geprüft. Die Abbildungen 3.18 und 3.19 zeigen die Scherkraft und den Scherweg als Ergebnis des Prüfverfahrens Schichtenverbund nach Leutner innerhalb der Schichten. Zu beachten ist, dass die Skalierung bei der Darstellung der Scherkraft geändert werden musste, da insbesondere die Deckschichtasphalte lediglich geringe Ergebnisse lieferten.

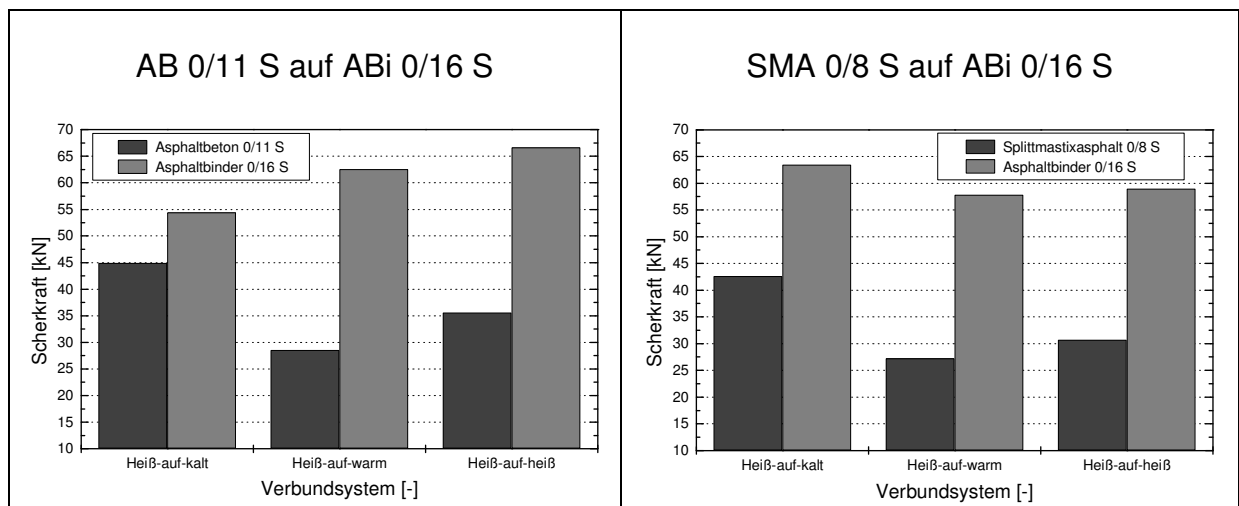


Abbildung 3.18 Schichtenverbund nach Leutner – Scherkraft [kN]
- Innerhalb der Schichten -

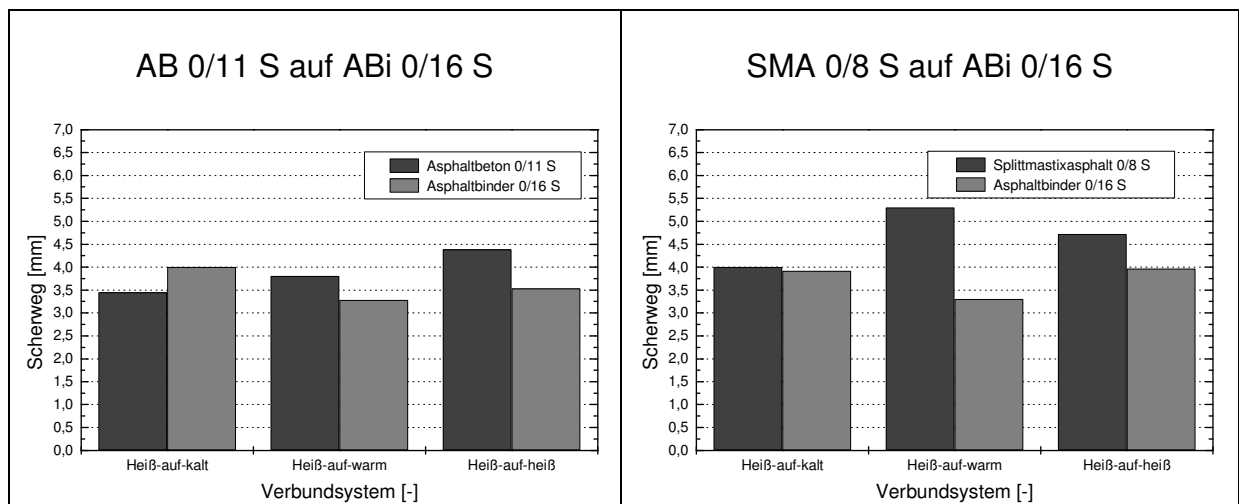


Abbildung 3.19 Schichtenverbund nach Leutner – Scherweg [mm]
- Innerhalb der Schichten -

Zunächst fällt auf, dass in der Binderschicht in allen Fällen höhere Scherkräfte gemessen werden, als in den Deckschichten. Sowohl Asphaltbeton als auch Splittmastixasphalt liefern bei den Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm erheblich geringere Scherkräfte, als bei der Variante Heiß-auf-kalt. Werden die Ergebnisse mit dem Verdichtungszustand dieser Schichten verglichen, ist es plausibel, dass geringer verdichtete Schichten auch geringere Scherkräfte liefern. Der Scherweg zeigt beim Asphaltbinder keine deutlichen Tendenzen. Bei den Deckschichten kann festgestellt werden, dass bei den Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm der Scherweg

länger ist, als bei der Variante Heiß-auf-kalt, was vermutlich wiederum auf den geringeren Verdichtungszustand zurückgeführt werden kann.

Allerdings müssen die Ergebnisse der Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm mit Vorsicht betrachtet werden, da die Schichtdicke mit 25 mm sehr gering ist und ein ungewollter Einfluss auf Grund des geringen Abstandes der Scherebene zur Deckschichtoberfläche nicht ausgeschlossen werden kann.

3.3.1.2 Bewitterte Asphaltbinderoberfläche

Um die unterschiedliche Wirkung der Vorspritzmittel bei ausgemagerten Asphaltoberflächen zu prüfen, wurden zusätzlich zum ursprünglichen Prüfumfang Asphaltbinderoberflächen beansprucht, nach der Beanspruchung mit den Vorspritzmitteln behandelt und mit den beiden Deckschichtasphalten überbaut.

In Abbildung 3.20 ist die maximale Scherkraft als Ergebnis der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner der bewitterten Varianten dargestellt. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, sind die Ergebnisse der unbeanspruchten Varianten im gleichen Schaubild im Hintergrund abgebildet. Dabei sind die Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm lediglich der Vollständigkeit halber dargestellt, da bei diesen Varianten auf Grund der Art der Herstellung eine Verkehrsbeanspruchung auf der Binderschicht nicht möglich ist.

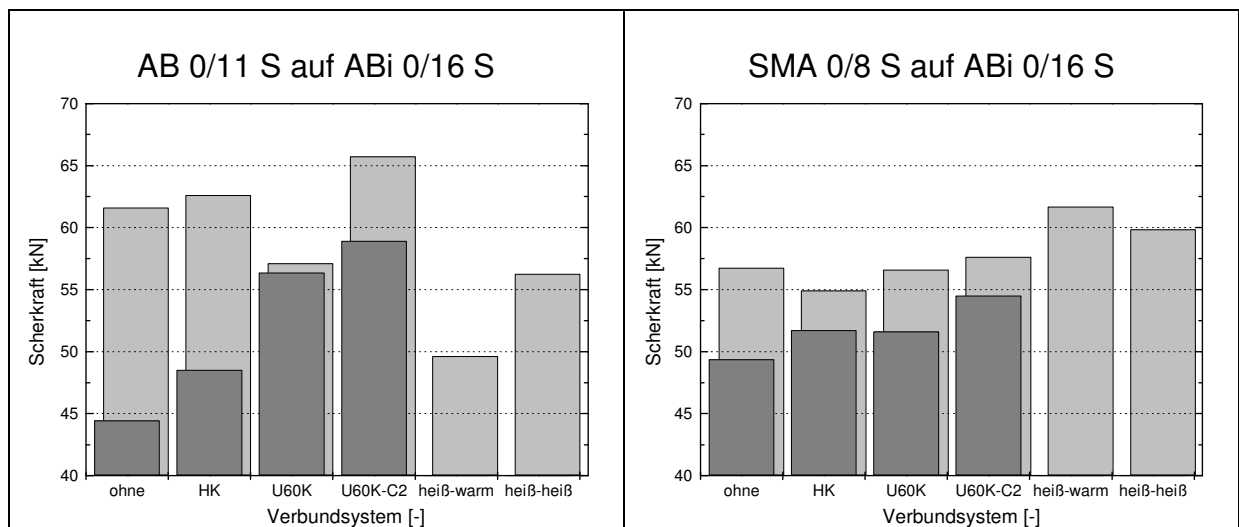


Abbildung 3.20 Schichtenverbund nach Leutner – Scherkraft [kN]
- Bewitterte Varianten -

Die Wirkung der Vorspritzmittel lässt sich bei den bewitterten Varianten besonders deutlich erkennen. Die Variante ohne Vorspritzmittel liefert deutlich geringere Werte, als die Varianten mit Vorspritzmittel. Ebenfalls lässt sich die Qualität des erzielten Verbundes in Abhängigkeit der Vorspritzmittel erkennen: Bereits bei der Verwendung von Haftkleber (HK) kann ein Anstieg der Scherkraft festgestellt werden. Beim Asphaltbeton erhöht sich die Scherkraft bei der Verwendung der U 60 K weiter, während beim Splittmastixasphalt die Scherkraft beim Haftkleber und U 60 K auf gleichem Niveau liegen. Die größten Scherkräfte und damit die günstigste Verbundwirkung wird bei der Verwendung der mit PmB modifizierten U 60 K - C2 erzielt.

In der Abbildung 3.21 ist der Scherweg der bewitterten Systeme dargestellt. Als Vergleich sind ebenfalls die Ergebnisse der frischen Varianten im Hintergrund dargestellt.

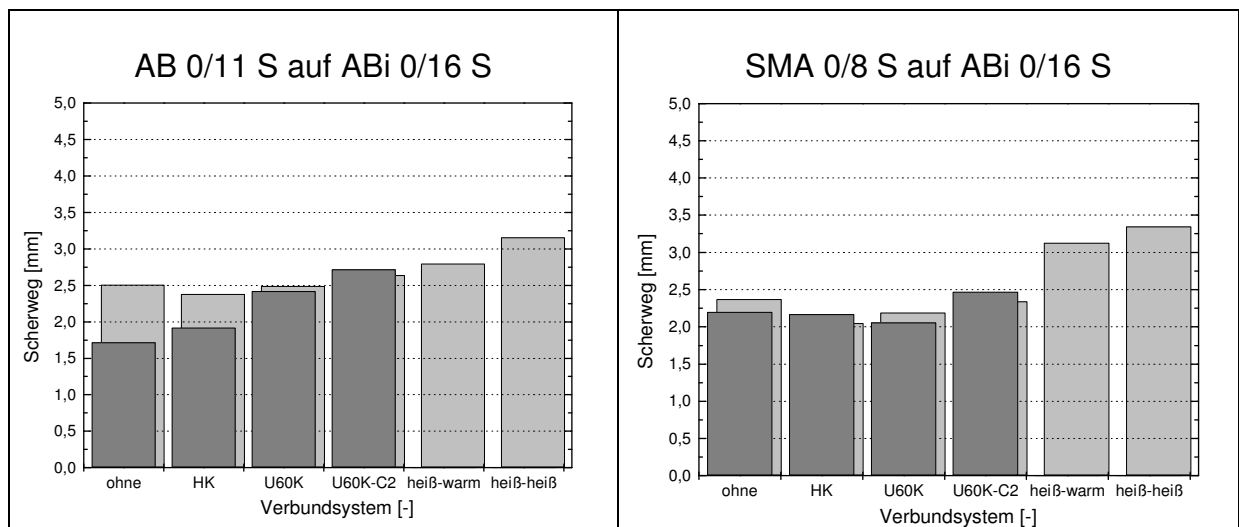


Abbildung 3.21 Schichtenverbund nach Leutner – Scherweg [mm]
- Bewitterte Varianten -

Auffällig sind die Ergebnisse der Splittmastixasphaltvarianten, die praktisch alle auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Sowohl die Bewitterung der Asphaltbinderoberfläche, als auch die unterschiedlichen Vorspritzmittel haben offenbar keinen messbaren Einfluss auf die Größe des Scherwegs. Beim Asphaltbeton zeigt sich ein anderes Bild. Hier erreicht die Variante ohne Vorspritzmittel einen geringeren Scherweg, während die Varianten mit den beiden Bitumenemulsionen deutlich längere Scherwege erreichen. Die Verwendung eines Haftklebers verlängert den Scherweg kaum.

3.3.2 Haftzugprüfung

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den unbeanspruchten Varianten und an den bewitterten Varianten zusammenfassend dargestellt. Da bei dem Verfahren der Haftzugprüfung der Ort des Versagens versuchstechnisch nicht vorgegeben ist, tritt das Versagen im schwächsten Teil des Systems auf. Im Gegensatz zum Prüfverfahren Schichtenverbund nach Leutner kann bei der Haftzugprüfung der Bruch sowohl innerhalb der Schichtgrenze, aber auch innerhalb der Schichten entstehen. Anhand der Klassifizierung der Bruchfläche wurde festgestellt, ob innerhalb der Schichtgrenze oder ggf. innerhalb welcher Schicht ein Versagen aufgetreten ist. Diese Beobachtungen sind in der Anlage III vollständig dokumentiert.

3.3.2.1 Unbeanspruchte Asphaltbinderoberfläche

In der Abbildung 3.22 sind die Ergebnisse der Haftzugprüfung dargestellt. Die Säulen zeigen den Mittelwert aus den drei Einzelwerten, die drei Einzelwerte sind als Punkte dargestellt.

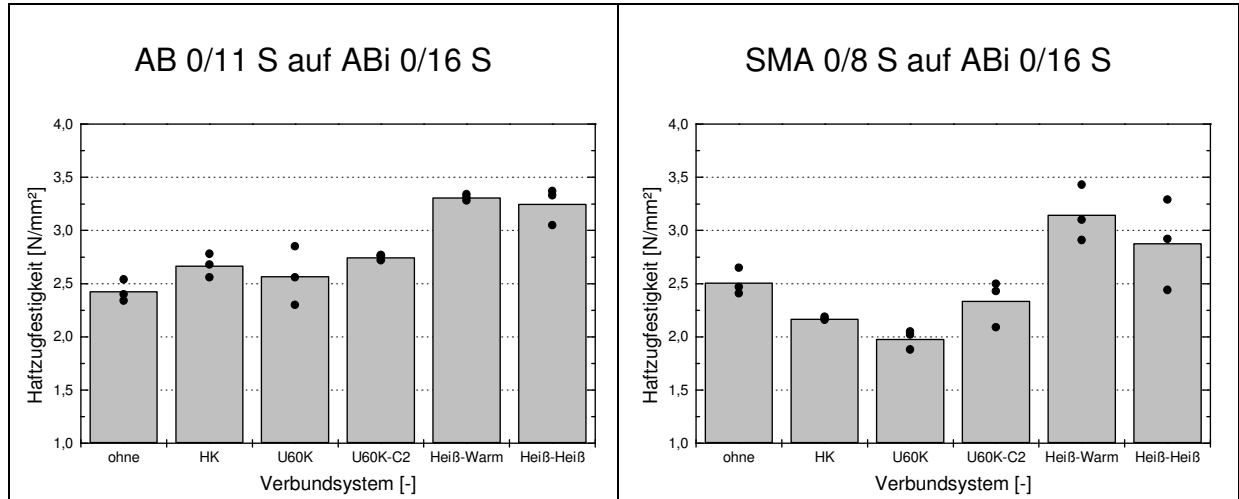


Abbildung 3.22 Ergebnis der Haftzugprüfung – Haftzugfestigkeit [N/mm²]

Beim Asphaltbeton zeigt sich eine tendenzielle Verbesserung der Haftzugfestigkeit der Varianten mit Vorspritzmittel gegenüber der Variante Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel. Zwischen den verschiedenen Vorspritzmitteln lässt sich praktisch kein Unterschied feststellen.

Beim Splittmastixasphalt ist ein deutlicheres Bild zu erkennen. Hier erreicht die Variante Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel höhere Werte, als die Varianten mit Vorspritzmitteln. Bei den Vorspritzmitteln erreicht tendenziell die U 60 K die geringsten und die U 60 K - C2 die höchsten Haftzugfestigkeiten.

Unabhängig von der Art des Deckschichtasphaltes erreichen die Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm deutlich die größten Haftzugfestigkeiten. In diesem Zusammenhang muss unbedingt die Bruchklassifizierung mit berücksichtigt werden, da der Bruch bei diesen Varianten größtenteils nicht innerhalb der Schichtgrenze erfolgte. Beim Asphaltbeton (Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm) wurde in 4 von 6 Fällen ein Bruch innerhalb der Deckschicht festgestellt, beim Splittmastixasphalt (Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm) in 5 von 6 Fällen ein Bruch innerhalb des Asphaltbinders (vgl. Tabelle A13 und A15 in Anhang III). Bei diesen Varianten ist danach der Asphaltbeton – bzw. bei der Splittmastixasphaltdeckschicht der Asphaltbinder – das schwächste

te Glied des Systems, nicht die Schichtgrenze. Im Gegensatz dazu erfolgte bei den Varianten Heiß-auf-kalt der Bruch praktisch ausschließlich an der Schichtgrenze.

3.3.2.2 Bewitterte Asphaltbinderoberfläche

In der Abbildung 3.23 sind die Ergebnisse der Haftzugprüfung der Varianten dargestellt, die auf bewitterten Asphaltbinderoberflächen hergestellt wurden. Als Vergleich sind die Ergebnisse der Varianten mit der unbeanspruchten Asphaltbinderoberfläche im Hintergrund dargestellt.

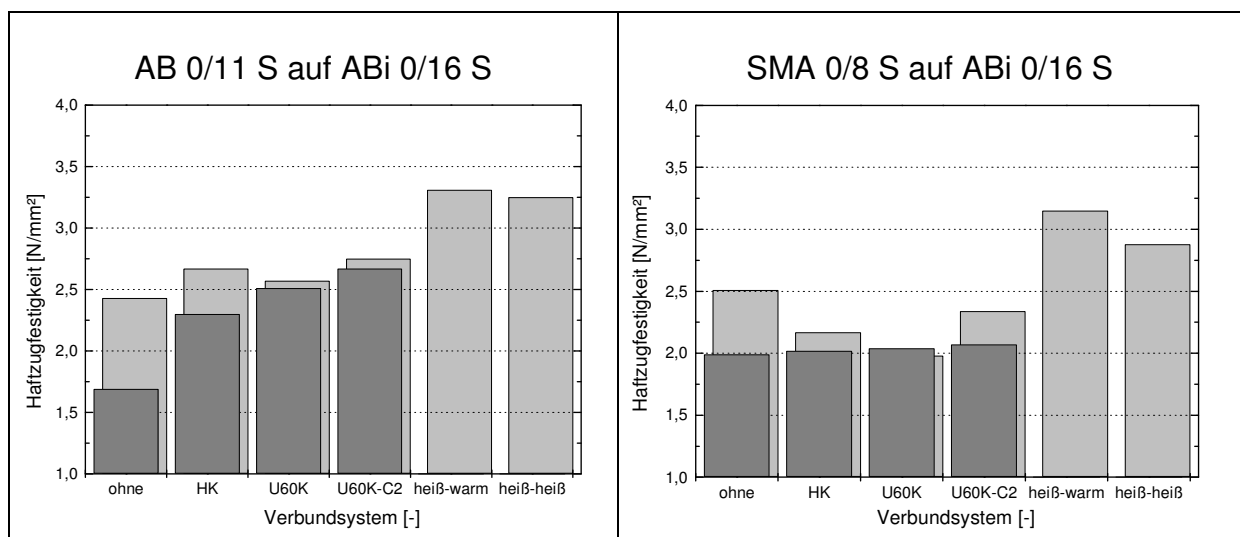


Abbildung 3.23 Ergebnis der Haftzugprüfung – Haftzugfestigkeit [N/mm²]
– bewitterte Varianten –

Eine deutliche Wirkung der Vorspritzmittel ist beim Asphaltbeton als Deckschicht zu erkennen. Während die Variante ohne Vorspritzmittel erheblich geringere Werte erreicht, liegen die Varianten mit den Emulsionen U 60 K und U 60 K - C2 praktisch im Bereich der jeweiligen unbeanspruchten Variante. Die Variante mit dem Haftkleber erreicht diesen Wert nicht, er liegt aber deutlich höher als bei der Variante ohne Vorspritzmittel.

Eine Wirkung der Vorspritzmittel ist beim Splittmastixasphalt nicht zu erkennen: Sowohl ohne Vorspritzmittel, als auch mit wurden praktisch gleiche Haftzugfestigkeiten gemessen. Die bei der U 60 K gemessene, geringfügig höhere Haftzugfestigkeit der bewitterten Variante ist vermutlich auf die Verfahrenspräzision zurückzuführen. Bei

allen geprüften Systemen der bewitterten Variante erfolgte der Bruch an der Schichtgrenze.

3.4 Versuchsergebnisse zur Prüfung des Verformungsverhaltens

Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens der Asphaltssysteme wurden Spurbildungsversuche in Anlehnung an die TP A-StB, Teil: Spurbildungsversuch – Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad“ sowie dynamische Stempeleindringversuche gemäß AiF Forschungsvorhaben Nr. 12522 N durchgeführt. Die Ergebnisse der Prüfungen sind im Anhang IV vollständig dokumentiert.

3.4.1 Spurbildungsversuch

In den Abbildungen 3.24 und 3.25 sind die Ergebnisse der Spurbildungsversuche dargestellt. Die Einzelergebnisse sind als Punkt, der Mittelwert aus drei Einzelergebnissen ist als Balken dargestellt. Im Anhang IV sind in den Abbildungen A.1 bis A.5 beispielhaft der Querschnitt der Spurrinne einiger ausgewählter Asphaltprobeplatten dargestellt.

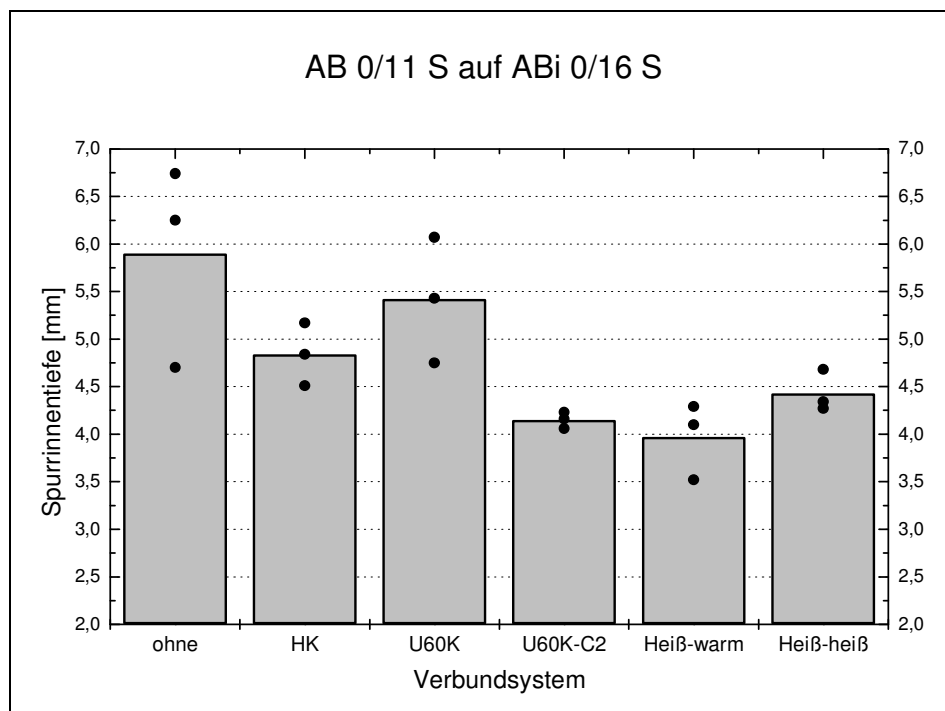


Abbildung 3.24 Ergebnisse der Spurbildungsversuche

Tendenziell ist anhand der Spurrinnentiefen beim Asphaltbeton als Deckschicht zu erkennen, dass die Variante ohne Vorspritzmittel verformungsanfälliger reagiert. Die Verwendung von Vorspritzmitteln beeinflusst das Verformungsverhalten dahingehend, dass die Verwendung von U 60 K praktisch keine, die Verwendung von Haftkleber eine geringfügige und die Verwendung von U 60 K - C2 eine deutliche Verbesserung des Verformungsverhaltens des Asphaltsystems aufzeigt.

Sowohl die Variante Heiß-auf-heiß als auch Heiß-auf-warm zeigen ebenfalls ein günstigeres Verformungsverhalten, als die Variante Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel. Vor dem Hintergrund, dass der Asphaltbeton bei diesen Varianten einen um mindestens 2 % geringeren Verdichtungsgrad besitzt, als die Variante Heiß-auf-kalt, ist das günstigere Verformungsverhalten bemerkenswert.

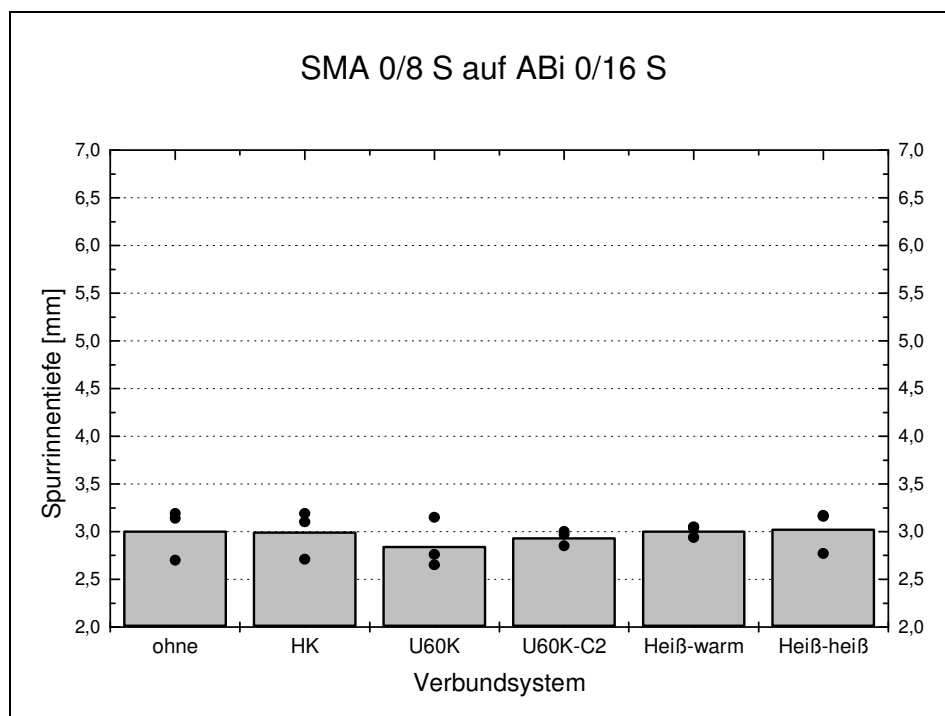


Abbildung 3.25 Ergebnisse der Spurbildungsversuche

Beim Splittmastixasphalt als Deckschicht muss festgestellt werden, dass trotz der im Vergleich zur TP A-StB erheblich höheren Belastung durch die Sondergewichte eine Spreizung der Ergebnisse nicht festgestellt werden kann. Es zeigt sich auch hier – wie bereits in vorhergehenden Forschungsarbeiten (z.B. FE 07.194 „Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten“) festgestellt, dass der Spurbildungsversuch zur Ansprache des Verfor-

mungsverhaltens insbesondere bei standfesten Asphalten keine ausreichende Differenzierung der Ergebnisse liefert.

3.4.2 Dynamischer Stempелеindringversuch

In den Abbildungen 3.26 und 3.27 sind die Ergebnisse der dynamischen Stempelseindringversuche dargestellt. Zu beachten ist, dass für die beiden Deckschichtasphalte zwar eine gleiche Skalierung der Ordinate gewählt wurde – jedoch auf einem unterschiedlichen Niveau.

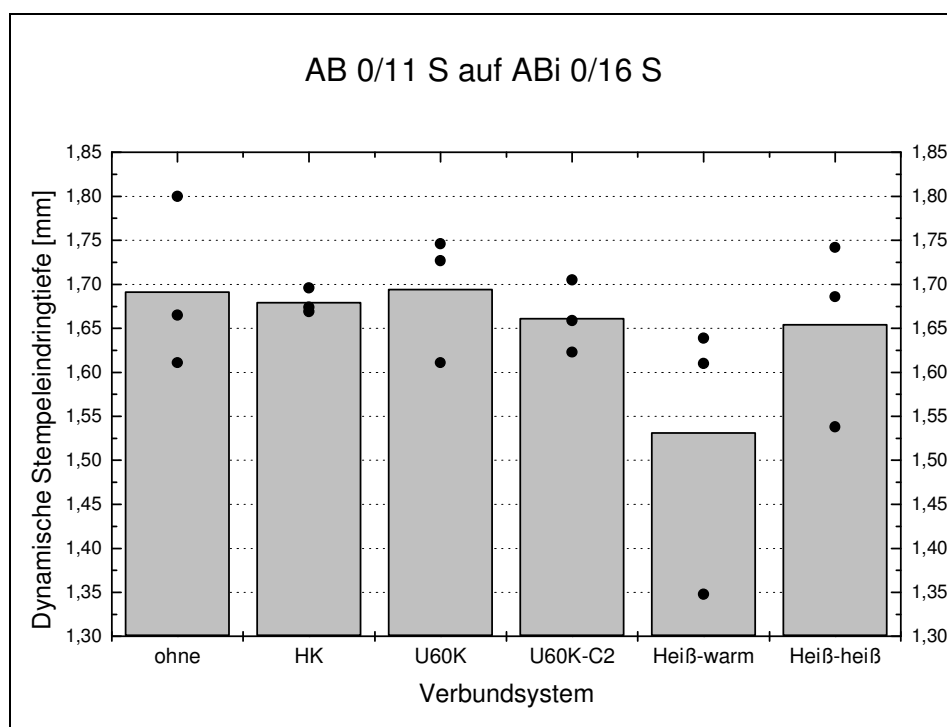


Abbildung 3.26 Ergebnisse der dynamischen Stempelseindringversuche

Die Ergebnisse der dynamischen Stempelseindringversuche mit dem Asphaltbeton als Deckschichtasphalt zeigen keinen Einfluss der Vorspritzmittel. Lediglich das Ergebnis der Variante Heiß-auf-warm liegt geringfügig unterhalb des Niveaus der übrigen Varianten – was allerdings auf den geringen Einzelwert zurückzuführen ist.

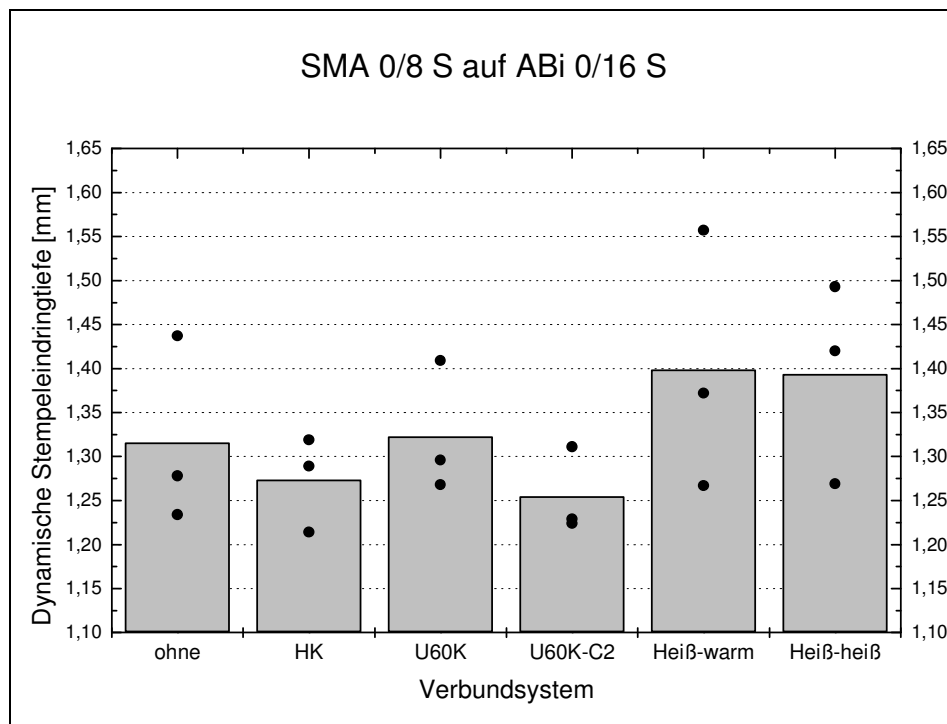


Abbildung 3.27 Ergebnisse der dynamischen Stempelseindringversuche

Beim Splittmastixasphalt als Deckschicht können lediglich Tendenzen erkannt werden. Die Varianten mit den Vorspritzmitteln liefern praktisch gleiche dynamische Stempelseindringtiefen, während die Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm tendenziell höhere Stempelseindringtiefen erreichen und somit als tendenziell verformungsanfälliger angesprochen werden können.

3.5 Versuchsergebnisse der Bohrkernproben

An den entnommenen Bohrkernproben wurde der Schichtenverbund nach Leutner zwischen Deck- und Binderschicht bestimmt, sowie die Haftzugfestigkeit an der Schichtgrenze festgestellt. In den Abbildungen 3.28 und 3.29 sind jeweils die Scherkraft und der Scherweg als Ergebnis der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner dargestellt.

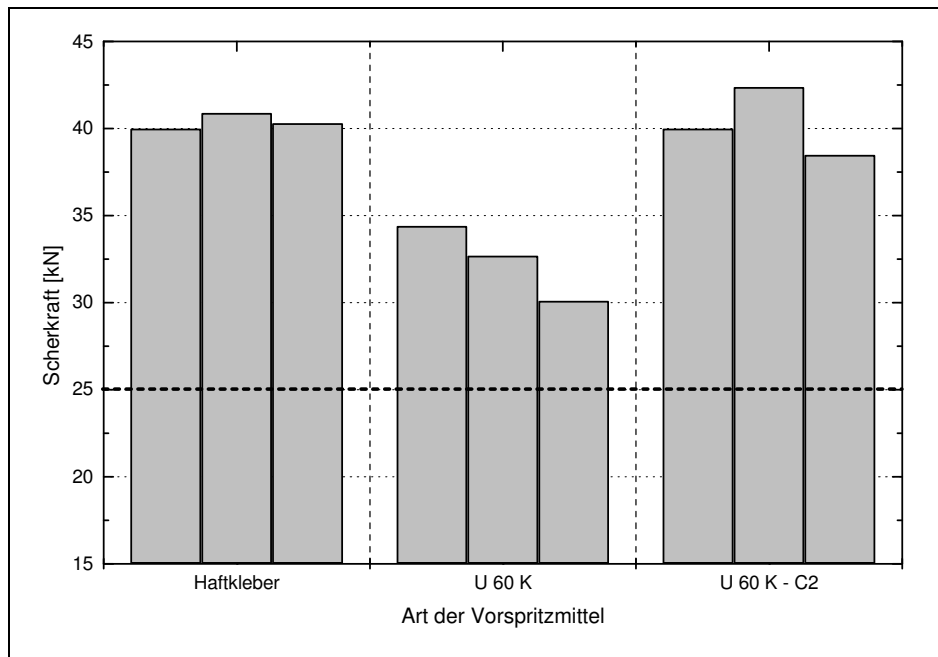


Abbildung 3.28 Schichtenverbund nach Leutner – Abscherkraft [kN]

Bei der verwendeten Vorspritzmenge von 300 mg/m^2 erreicht die Bitumenemulsion U 60 K die geringste Scherkraft, während für den Haftkleber und die polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 vergleichbare Abscherkräfte gemessen wurden. Zusätzlich ist der von Grätz und Stöckert [10] vorgeschlagene Anforderungswert von 25 kN zwischen Deck- und Binderschicht gestrichelt eingezeichnet, den alle Einzelprüfungen der Varianten erfüllen.

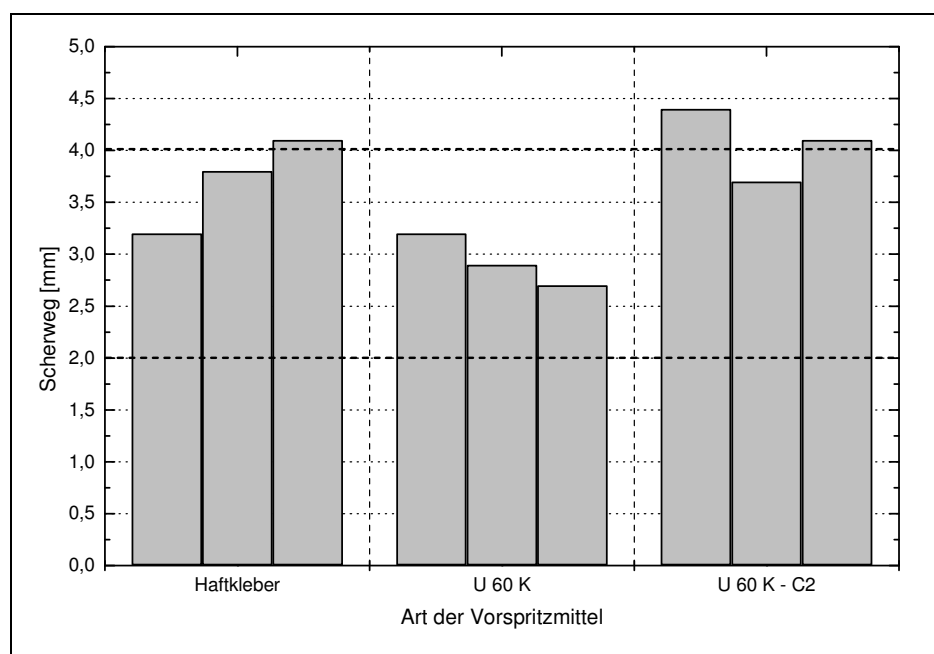


Abbildung 3.29 Schichtenverbund nach Leutner – Scherweg [mm]

Beim Scherweg kann festgestellt werden, dass die Werte des Haftklebers stärker streuen und zwischen dem unteren Niveau der Bitumenemulsion U 60 K und dem oberen Niveau der mit PmB modifizierten U 60 K - C2 eingeordnet werden müssen. Vergleicht man die gemessenen Scherwege mit den von Grätz und Stöckert [10] vorgeschlagenen Anforderungswerten von 2 bis 4 mm (in Abbildung 3.29 gestrichelt dargestellt), überschreiten 3 Einzelwerte sowie der Mittelwert der U 60 K - C2 die obere Grenze.

In Abbildung 3.30 sind die Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit dargestellt.

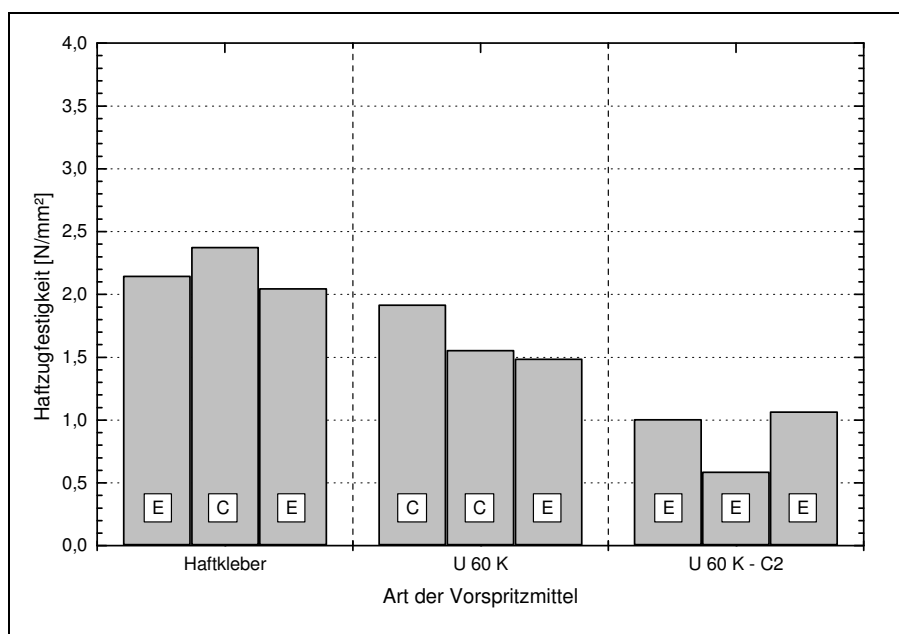


Abbildung 3.30 Haftzugfestigkeit [N/mm²]

Die in Abbildung 3.30 dargestellten Buchstaben beziehen sich auf den Bruchzustand:

C: Bruch in der Schichtgrenze

E: Bruch in der Unterlage, d.h. in der Binderschicht

Auffällig ist der häufige Bruch in der Binderschicht (Bruchtyp: E), der eine korrekte prüftechnische Ansprache der Haftzugfestigkeit der Schichtgrenze in Frage stellt. Offenbar ist in diesen Fällen die Verbundwirkung der Schichtgrenze besser, als die Zugfestigkeit der Binderschicht. Die tatsächliche – theoretische – Zugfestigkeit an der Schichtgrenze muss in diesen Fällen höher sein, als der gemessene Wert der Haftzugfestigkeit.

Zum direkten Vergleich der Anspritzmittel untereinander lassen sich daher ausschließlich die Ergebnisse von Prüfungen verwerten, bei denen der Bruch innerhalb der Schichtgrenze erfolgte. Danach kann festgestellt werden, dass der Haftkleber höhere Haftzugfestigkeiten liefert, als die Bitumenemulsion U 60 K.

Über die mit PmB modifizierte U 60 K - C2 lassen sich keine Aussagen treffen, da ein Versagen aller Proben in der Binderschicht festgestellt wurde. Mit einem Verdichtungsgrad von lediglich 95 % ist dieser im Mittel um ca. 2-3 % geringer, als der Verdichtungsgrad des Asphaltbinders in den Testfeldern der beiden anderen Vorspritzmittel. Die Versagensursache liegt demnach nicht im Bereich der Schichtgrenze und damit im Wirkungsbereich der PmB-Emulsion, sondern im geringeren Verdichtungsgrad (und der dadurch reduzierten Zugfestigkeit) des Asphaltbinders. Warum in diesem Bereich der Verdichtungsgrad des Asphaltbinders derart gering ist, konnte nicht festgestellt werden.

4 Interpretation der Prüfergebnisse

Nachfolgend werden die Prüfergebnisse mit Hilfe von mathematisch-statistischen Auswerteverfahren interpretiert.

4.1 Schichtenverbund

Für die Beurteilung des Schichtenverbundes der unterschiedlichen Asphaltssysteme und Vorspritzmittel werden sowohl die Haftzugprüfung als auch die Prüfung Schichtenverbund nach Leutner gemeinsam vergleichend betrachtet.

Hierfür müssen die Ergebnisse der Prüfungen zunächst in zwei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe beinhaltet das Herstellverfahren Heiß-auf-kalt ohne und mit unterschiedlichen Vorspritzmitteln. Die zweite Gruppe besteht aus den beiden Verfahren Heiß-auf-warm und Heiß-auf-heiß. Diese Unterscheidung ist notwendig, da sich auf Grund der Herstellverfahren ein unterschiedlicher Verdichtungsgrad und damit auch ein unterschiedlicher Hohlraumgehalt in den Schichten eingestellt hat, der einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Prüfungen ausüben kann.

Besonders deutlich ist dieser Einfluss bei den Ergebnissen der Haftzugprüfung, da auf Grund der Beanspruchung der Bruch – und somit das Ergebnis – an der schwächsten Stelle des Systems auftritt. In den Tabellen A.13 und A.15 ist zu erkennen, dass bei den Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm die schwächste Stelle nicht an der Schichtgrenze, sondern innerhalb der Schicht liegt. Diese Ergebnisse zeigen zwar, dass bei diesen Varianten ein hervorragender Schichtenverbund erreicht wurde – gleichzeitig sind diese aber erheblich vom Verdichtungsgrad der entsprechenden Schicht abhängig, in der der Bruch entsteht.

Bei dem Prüfverfahren Schichtenverbund nach Leutner ist zwar die Scherebene vorgegeben, d.h. das Versagen tritt an einer festgelegter Ebene auf, allerdings lässt sich die Schichtgrenze der Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm auf Grund von Verdrückungs- und Vermischungseffekten während der Verdichtung nicht deutlich festlegen. Der Schichtenübergang dieser Systeme ist fließend – die Prüfung erfolgt daher praktisch im Übergangsbereich beider Schichten.

Eine Abhängigkeit der gemessenen Scherkraft innerhalb der Asphaltbinderschicht vom Hohlraumgehalt ist nicht zu erkennen. Im Gegensatz dazu kann jedoch eine Abhängigkeit zwischen der Größe der Scherkräfte innerhalb der Deckschicht und dem Hohlraumgehalt vermutet werden.

Tabelle 4.1. zeigt die Ergebnisse der multiplen Varianzanalyse zur Bestimmung des Varianzanteils der Ursachen Art der Deckschicht und Systemvariante (bzw. der daraus resultierende unterschiedliche Hohlraumgehalt in der Deckschicht) auf die Prüfgröße Scherkraft innerhalb der Deckschicht.

Tabelle 4.1 Ergebnisse der multiplen Varianzanalysen – 2fache Klassifikation

Ursache		Varianzanteil [%]: Scherkraft in der Deckschicht
A	Art des Deckschichtasphaltes	4,03
B	Systemvarianten (Heiß-kalt/Heiß-warm/Heiß-heiß)	75,07
AB	Kombination aus A und B	-
Fehler		20,90
Gesamt		100,00

Danach kann mit einem Varianzanteil von 75,07 % als Hauptursache die Systemvariante nachgewiesen werden. Da der Hohlraumgehalt eng mit der Art der Herstellung der Systeme verknüpft ist (höhere Hohlraumgehalte bei den Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm), gilt dieser Nachweis indirekt auch für die Prüfgröße Hohlraumgehalt. In diesem Zusammenhang darf aber nicht vernachlässigt werden, dass auf Grund der geringen Schichtdicke der Deckschicht (Variante Heiß-auf-heiß und heiß-auf-warm) bei der Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner innerhalb der Schicht die Mindestschichtdicke für das Prüfverfahren unterschritten wurde und dadurch unbekannte Effekte das Ergebnis beeinflusst haben können.

Einfluss der Vorspritzmittel

Um den Einfluss der Vorspritzmittel auf die Ergebnisse des Schichtenverbundes zu bestimmen, werden die vier Varianten des Systems Heiß-auf-kalt untereinander verglichen. Zunächst kann festgestellt werden, dass die unterschiedlichen Deckschichtasphalte unterschiedlich auf die Vorspritzmittel reagieren.

Asphaltbeton

Beim Asphaltbeton als Deckschicht ist eine tendenzielle Verbesserung der Scherkraft bei Verwendung des Haftklebers und der polymermodifizierten Bitumenemulsion U 60 K - C2 festzustellen, wobei die Verbesserung bei der Verwendung der U 60 K - C2 deutlicher zu erkennen ist. Die Verwendung der Bitumenemulsion U 60 K verschlechtert die Scherkraft tendenziell. Ähnliches ist bei der Prüfung der Haftzugfestigkeit zu erkennen, allerdings liegt hier die U 60 K auf vergleichbarem Niveau, wie die beiden anderen Vorspritzmittel.

Besonders deutlich ist der Einfluss der Art des Vorspritzmittels an den Varianten mit den bewitterten Oberflächen zu erkennen. Bei der Verwendung von Vorspritzmitteln werden sowohl höhere Scherkräfte als auch höhere Haftzugfestigkeiten erreicht. Bei den bewitterten Oberflächen zeigt sich im Gegensatz zu den frischen Oberflächen, dass beide Bitumenemulsionen im Vergleich zum Haftkleber einen besseren Schichtenverbund erzeugen. Sowohl die Scherkräfte als auch die Haftzugfestigkeit liegen deutlich höher. Dies ist plausibel, wenn man die Wirkungsweise des Haftklebers betrachtet: Durch das Lösemittel im Haftkleber wird bei den frischen Oberflächen der Bindemittelfilm angelöst, während bei den ausgemagerten Oberflächen der bewitterten Variante kein Bindemittelfilm zum Anlösen vorhanden ist. Beide Prüfungen – Schichtenverbund nach Leutner und Haftzugprüfung – zeigen geringfügig günstigere Werte für die polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2.

Splittmastixasphalt

Beim Splittmastixasphalt als Deckschicht auf der frischen Asphaltbinderschicht kann festgestellt werden, dass das Vorspritzmittel offenbar keinen Einfluss auf die Scherkraft ausübt, auch ein Einfluss auf den Scherweg ist praktisch nicht zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist auf der bewitterten Asphaltbinderoberfläche ein Einfluss vorhanden. Sowohl der Haftkleber als auch die U 60 K verbessern geringfügig, die U 60 K - C2 verbessert etwas deutlicher den Schichtenverbund.

Die Verwendung von Vorspritzmitteln auf der frischen Asphaltbinderoberfläche wirkt sich ungünstig auf die Haftzugfestigkeit aus. Die Verbundwirkung der beiden Bindemittel aus Deck- und Binderschicht (beides PmB 45 A) ohne ein Vorspritzmittel liefert

die höchsten Haftzugfestigkeiten. Wider Erwarten haben die Vorspritzmittel bei der ausgemagerten Asphaltbinderoberfläche der bewitterten Varianten keinen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit.

Beide Deckschichtasphalte reagieren unterschiedlich auf die Verwendung von Vorspritzmitteln. Während die verwendeten Vorspritzmittel beim Splittmastix 0/8 S praktisch keinen bzw. zum Teil sogar einen ungünstigen Einfluss auf den Schichtenverbund ausüben, ist beim Asphaltbeton 0/11 S ein Einfluss der unterschiedlichen Vorspritzmittel zu erkennen. Dieser Unterschied kann nicht nur mit dem PmB 45 A im Splittmastixasphalt begründet, sondern muss auch im Unterschied der Asphaltzusammensetzung (kleineres Größtkorn, höherer Bindemittelgehalt, größerer Mastixanteil) gesucht werden.

In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der multiplen Varianzanalysen der dreifachen Klassifikation zusammengefasst, die die Einflüsse der verschiedenen Varianten bewertet. Dargestellt sind die Anteile der einzelnen Ursachen, die zu den Ergebnissen geführt haben, sowie die Kombinationen der Ursachen und die Einflüsse, die keiner Ursache zugeschrieben werden können (Fehleranteil).

Tabelle 4.2 Ergebnisse der multiplen Varianzanalysen – dreifache Klassifikation

Ursache		Varianzanteil [%]: Haftzugfestigkeit	Varianzanteil [%]: Scherkraft
A	Art des Deckschichtasphaltes	18,70	2,23
B	Bewitterungszustand	15,43	37,47
C	Art der Vorspritzmittel	-	6,79
AB	Kombination aus A und B	-	5,69
AC	Kombination aus A und C	29,84	-
BC	Kombination aus B und C	16,86	4,41
ABC	Kombination aus A, B und C	-	8,95
Fehler		19,17	34,46
Gesamt		100,00	100,00

Als Einflussgrößen wurden die Art des Deckschichtasphaltes, der Bewitterungszustand und die Art des Vorspritzmittels im Hinblick auf die Ergebnisse des Schichtenverbunds (Scherkraft) und die Haftzugfestigkeit untersucht.

Anhand der Ergebnisse der Varianzanalyse kann festgestellt werden, dass die Kombination aus der Art der Deckschicht und der Art des Vorspritzmittels den größten Einfluss auf die Ergebnisse der Haftzugfestigkeit ausüben. Festgestellt werden muss ebenfalls ein hoher Fehleranteil, d.h. dass Einflüsse auf das Ergebnis der Haftzugfestigkeit keiner Ursache zugeordnet werden können. Als drittgrößter Einfluss wird die Art des Deckschichtasphaltes erkannt.

Die Ergebnisse der Scherkraft werden am deutlichsten vom Bewitterungszustand beeinflusst. Auch hier ist der Fehleranteil vergleichsweise hoch. Die weiteren Ursachen werden mit lediglich geringen Varianzanteilen bestimmt, üben daher eher geringe Einflüsse aus.

Einfluss des Herstellverfahrens / Asphaltsystems

Die Art der Herstellung zeigt einen deutlichen Einfluss auf den Schichtenverbund. Sowohl die Scherkraft als auch die Haftzugfestigkeit zeigen beim Splittmastixasphalt als Deckschicht deutlich, dass mit den Verfahren Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm ein besserer Schichtenverbund erzielt werden kann, als mit dem Verfahren Heiß-auf-Kalt. Sowohl die Scherkräfte sind höher, als auch die Haftzugprüfung liefert deutlich höhere Kräfte.

Beim Asphaltbeton kann dieses leider nicht festgestellt werden. Zwar liegen die Haftzugfestigkeiten auch hier deutlich höher als bei der Variante Heiß-auf-kalt, gleichzeitig sind aber die Scherkräfte geringer. Die Ursache der geringen Scherkräfte können im vergleichsweise geringeren Verdichtungsgrad der Deckschicht vermutet werden. Auch der Ort des Bruchs bei der Haftzugprüfung unterstützt diese Vermutung: In 5 von 6 Fällen ist bei den Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm der Bruch im Bereich bzw. innerhalb der Deckschicht aufgetreten, so dass die Asphaltbetondeckschicht hier als schwächstes Glied identifiziert werden kann.

Der Splittmastixasphalt weist zwar ebenfalls bei den Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm einen geringeren Verdichtungsgrad auf, die Haftzugversuche zeigen aber deutlich, dass bei diesen Systemen die Binderschicht als schwächstes Glied identifiziert werden kann (Bruch innerhalb der Binderschicht in 5 von 6 Fällen).

Auf Grund der „unscharfen“ Schichtgrenze der Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm kann vermutet werden, dass bei der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner die Scherkraft das Versagen in der Scherebene vom schwächsten Glied des Systems verursacht wird. Daraus resultieren die vergleichsweise geringen Scherkräfte beim Asphaltbeton als Deckschicht, die unterhalb der Varianten Heiß-auf-kalt liegen (Versagen vom Deckschichtasphalt verursacht), und die im Gegensatz dazu gemessenen hohen Scherkräfte der Systeme mit dem Splittmastixasphalt als Deckschicht (Versagen vom Asphaltbinder verursacht).

Leider bestätigen die gemessenen Scherkräfte innerhalb der Deckschichten diese Vermutung nicht. Allerdings müssen auf Grund der geringen Schichtdicke die Ergebnisse des Schichtenverbundes nach Leutner innerhalb der Deckschicht bei diesen Varianten (Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm) in Frage gestellt werden. Nicht umsonst fordert die Arbeitsanleitung eine Mindestschichtdicke der zu prüfenden Schicht von 25 mm, die bei der Prüfung innerhalb der Deckschichten erheblich unterschritten wurde (Deckschichtdicke insgesamt ca. 25 mm).

In der Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse der multiplen Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation dargestellt, um den Einfluss des Deckschichtasphaltes sowie der Systemherstellung zu quantifizieren. Für die statistische Berechnung wurden die Herstellungsvariationen Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel, Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm verwendet.

Tabelle 4.3 Ergebnisse der multiplen Varianzanalysen – zweifache Klassifikation

Ursache		Varianzanteil [%]: Haftzugfestigkeit	Varianzanteil [%]: Scherkraft
A	Art des Deckschichtasphaltes	-	-
B	Systemvarianten (Heiß-kalt/Heiß-warm/Heiß-heiß)	76,40	-
AB	Kombination aus A und B	23,60	62,26
Fehler		0,00	37,74
Gesamt		100,00	100,00

Erfreulich ist die Tatsache, dass die Einflüsse auf die Haftzugfestigkeit vollständig den Ursachen zugeordnet werden können. Den Haupteinfluss kann dem Asphaltssystem mit 76,4 % zugeordnet werden, weiteren Einfluss auf die Haftzugfestigkeit übt die Kombination aus System und Deckschichtasphalt aus.

Weder die Deckschicht, noch das Asphaltssystem üben einzeln einen Einfluss auf die Scherkraft aus, lediglich deren Kombination. Darüber hinaus kann ein Großteil der gemessenen Effekte (37,74 %) keiner Ursache eindeutig zugeordnet werden.

Bohrkernuntersuchungen

In Abbildung 4.1 sind die Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner an den Bohrkernen der Versuchsstrecke und an den Bohrkernen aus den labortech-nisch hergestellten, walzsegment-verdichteten Asphaltprobeplatten vergleichend ge-genübergestellt. Dabei muss beachtet werden, dass auf der Versuchsstrecke die Menge von 300 g/m² vorgespritzt wurde. Da diese Vorspritzmenge in Labor nicht verwendet wurde, wurden die Ergebnisse der labortechnischen Prüfungen mit 250 g/m² und 350 g/m² linear interpoliert und als Vergleich dargestellt.

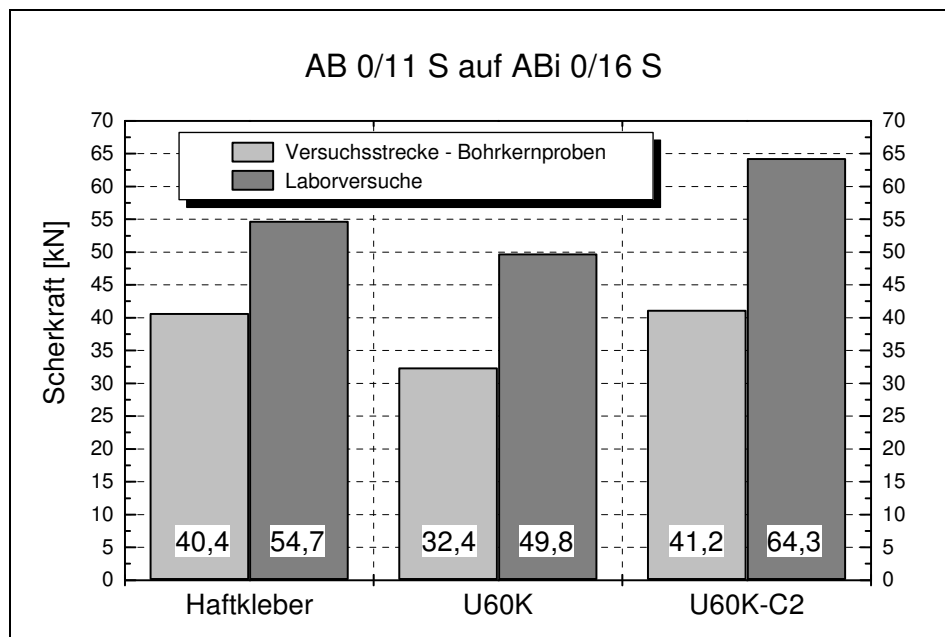


Abbildung 4.1 Vergleich der Laborprüfungen mit den Bohrkernuntersuchungen der Versuchsstrecke

Anhand der Abbildung 4.1 ist deutlich zu erkennen, dass der Trend der im Labor hergestellten Asphaltssysteme sich ebenfalls an den Bohrkernen der Versuchsstrecke wiederfindet. Das zeigt zunächst, dass die in Labor verwendete Applikationstechnik der Vorspritzmittel praxisadäquate Ergebnisse liefert. Die Ursache für die jeweils höheren Scherkräfte der Laborproben kann damit erklärt werden, dass im Laboratorium optimale Bedingungen herrschen und die Asphaltbinderoberfläche weder verschmutzt oder in einer anderen Art und Weise beansprucht wurde, während die Asphaltbinderoberfläche der Versuchsstrecke kurzzeitig unter Verkehr lag. Ein vergleichbarer Effekt hatte sich bei den labortechnisch hergestellten, bewitterten Varianten gezeigt.

4.2 Verformungsverhalten

Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens der unterschiedlichen Asphaltssysteme und Vorspritzmittel werden sowohl die Spurbildungsversuche als auch die dynamischen Stempleindringtiefen vergleichend betrachtet und statistisch ausgewertet.

Insgesamt zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Varianten mit der Splittmastixdeckschicht deutlich verformungsresistenter sind, als die Systeme mit der Asphaltbetondeckschicht.

Asphaltbetondeckschicht

Bei den Variationen der Systeme mit Asphaltbeton zeigt der Spurbildungsversuch tendenzielle Vorteile im Verformungsverhalten bei den Vorspritzmitteln Haftkleber und U 60 K - C2. Die Ergebnisse des dynamischen Stempel Eindringversuchs zeigen diese Tendenzen nicht – die Prüfungen liefern für die unterschiedlichen Vorspritzmittel praktisch gleiche Ergebnisse.

Überraschend sind die Ergebnisse für die Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm, die trotz des vergleichsweise geringen Verdichtungsgrades und damit auch höheren Hohlraumgehaltes der Asphaltbetondeckschicht (1,4 % geringerer Verdichtungsgrad und 1,3 Vol.-% höherer Hohlraumgehalt als die Variante Heiß-auf-kalt) beim Spurbildungsversuch geringere Spurrinnentiefen, beim dynamischen Stempel Eindringversuch vergleichbare Eindringtiefen erreichen, wie die Varianten Heiß-auf-kalt. Diese vergleichsweise gute Verformungsresistenz dieser Kompaktasphaltvarianten kann vermutlich der dünnen Deckschichtdicke zugerechnet werden.

Splittmastixdeckschicht

Als Splittmastixvariante wurde ein SMA 0/8 S mit PmB 45 A gewählt, der als besonders verformungsresistent eingestuft werden muss. Dies zeigt sich an den Ergebnissen der Spurbildungsversuche, die keine Differenzierung der unterschiedlichen Varianten zulassen. Die dynamischen Stempel Eindringversuche zeigen ähnliche Ergebnisse, allenfalls tendenziell können die Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm als verformungsanfälliger erkannt werden – jedoch liegen diese Tendenzen innerhalb der Prüftoleranz und sind statistisch nicht zu belegen.

In Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse der multiplen Varianzanalysen dargestellt, anhand derer untersucht werden soll, welchen Varianzanteil die unterschiedlichen Ursachen (verschiedene Deckschichtasphalte; verschiedene Verbundsysteme) auf die Ergebnisse der Verformungsversuche haben.

Tabelle 4.4 Ergebnisse der multiplen Varianzanalysen – 2fache Klassifikation

Ursache		Varianzanteil [%]: Spurrinnentiefe	Varianzanteil [%]: Dynamische Stem- peleindringtiefe
A	Art des Deckschichtasphaltes	82,07	81,28
B	Verbundsystem (Heiß-kalt ohne, HK, U60K, U60K-C2/Heiß-warm/Heiß-heiß)	-	-
AB	Kombination aus A und B	10,38	4,36
Fehler		7,55	14,36
Gesamt		100,00	100,00

Sowohl für den Spurbildungsversuch als auch für den dynamischen Stempelein-
dringversuch bestätigten die multiplen Varianzanalysen die bereits beschriebenen
Beobachtungen. Die Art des Deckschichtasphaltes übt mit 81,28 % bzw. 82,07 %
den größten Einfluss auf die Ergebnisse der Verformungsversuche aus, während der
Einfluss des Verbundsystems statistisch nicht vorhanden ist. Sowohl der Kombinati-
onseinfluss aus Deckschichtart und Verbundsystem sowie die Einflüsse die keiner
Ursache zugerechnet werden können sind relativ gering.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass die durchgeführten Versuche zur Anspra-
che des Verformungsverhaltens bei den gewählten standfesten Asphaltarten keine
deutliche Differenzierung der einzelnen Asphaltssysteme zulassen. Es muss daher
der Frage nachgegangen werden, ob der Versuchsaufbau generell geeignet ist, die
unterschiedlichen Verbundsysteme prüftechnisch anzusprechen, oder ob – bei den
labortechnisch optimalen Herstellbedingungen – praktisch nicht messbare Unter-
schiede vorhanden sind.

Für den Spurbildungsversuch ist bekannt, dass mit diesem Versuchsaufbau lediglich
erhebliche Unterschiede im Verformungsverhalten messbar sind. Diese Unterschiede
sind im Rahmen der hier referierten Untersuchungen nur bei den beiden unterschied-
lichen Asphaltdeckschichten festgestellt worden. Ähnliches gilt hier offenbar auch für
den dynamischen Stempelein-
dringversuch, der möglicherweise auf Grund des Last-
eintrages (axiale Druck-Schwellbelastung – ohne Schubbeanspruchungskomponen-
te) eine Differenzierung der unterschiedlichen Verbundsysteme nicht zulässt.

Die während der Vorversuche durchgeführte Optimierung der Vorspritzmenge hat ebenfalls nicht unerhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse der Verformungsversuche. Für die Hauptversuche kamen auf Grund der Optimierungsversuche ausschließlich Schichtensysteme zum Einsatz, die bereits einen optimalen Schichtenverbund aufwiesen - sogar die Varianten Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel.

Da bewusst keine Systeme mit schlechtem Schichtenverbund eingesetzt wurden, um die unterschiedlichen Vorspritzmittel vergleichen zu können, waren die Unterschiede in den Systemen offenbar derart gering, dass die Versuche zur Ansprache der Verformungseigenschaften eine nur geringe Spreizung aufweisen. Eine Quantifizierung des Zusammenhangs der Prüfgrößen Schichtenverbund / Haftzugfestigkeit und den Ergebnissen der Verformungsversuche ist auf Grund der Messergebnisse nicht praktikabel.

5 Zusammenfassung

Nachfolgend werden die durchgeführten Prüfungen zusammenfassend interpretiert und daraus Folgerungen für die Praxis abgeleitet. Abschließend werden offene gebliebene Fragestellungen für weitergehende Forschungsarbeiten formuliert.

5.1 Zusammenfassung der Prüfergebnisse und Folgerungen für die Praxis

Zur Beurteilung der Wirkung von unterschiedlichen Vorspritzmitteln und verschiedenen Herstellmethoden auf den Schichtenverbund und das Verformungsverhalten von Asphaltssystemen wurden im labortechnischen Maßstab Schichtensysteme hergestellt und geprüft. Die Herstellung der Asphaltssysteme erfolgte mit den Verfahren Heiß-auf-kalt, Heiß-auf-warm und Heiß-auf-heiß. Bei dem Verfahren Heiß-auf-kalt wurden drei unterschiedliche Vorspritzmittel – Haftkleber, U 60 K und U 60 K - C2 gemäß TL PmOB – sowie eine Null-Variante ohne Vorspritzmittel hergestellt. Als weitere Variation wurden auf den Asphaltbinder 0/16 S zwei unterschiedliche Deckschichtasphalte, nämlich Asphaltbeton 0/11 S und Splittmastixasphalt 0/8 S aufgewalzt. Zusätzlich zum ursprünglich vorgesehenen Untersuchungsprogramm wurden Asphaltbinderoberflächen bewittert und anschließend mit den Vorspritzmitteln und den Deckschichtasphalten überbaut. Die Herstellung der Asphaltssysteme erfolgte mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät.

Um die optimale Verteilung der Vorspritzmittel zu gewährleisten, wurden 2 Verfahren entwickelt, den Haftkleber und die Bitumenemulsionen auf die Asphaltbinderoberfläche aufzubringen, nämlich mittels Sprühflasche (Haftkleber) und mit einer Schaumstofffarbrolle (Bitumenemulsionen). Weiterhin wurde vorab die Vorspritzmenge für jedes der 3 Vorspritzmittel variiert und anhand der Ergebnisse des Prüfverfahrens Schichtenverbund nach Leutner die optimale Menge festgelegt.

Die Hauptversuche erfolgten mit den optimierten Vorspritzmengen. Es wurden an den Asphaltssystemen der Schichtenverbund nach Leutner und die Haftzugfestigkeit zur Beurteilung des Schichtenverbundes, sowie Spurbildungsversuche und dynamische Stempel Eindringversuche zur Beurteilung des Verformungsverhaltens durchge-

führt. An den bewitterten Varianten wurde die Wirkung der Vorspritzmittel mit den Prüfungen Schichtenverbund nach Leutner und Haftzugfestigkeit geprüft.

Abschließend konnten die labortechnisch gewonnenen Ergebnisse auf Initiative und durch die Unterstützung der Firma Matthäi Bauunternehmung GmbH & Co. KG, Verden, mit Ergebnissen von Bohrkernproben aus einer Versuchsstrecke verglichen werden.

Nachfolgend werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend beschrieben.

Bei einer frischen Asphaltbinderoberfläche wirken sich hohe Vorspritzmittelmengen beim Asphaltbeton 0/11 S als Deckschicht ungünstig auf die Scherkraft aus.

Im Bereich zwischen 150 g/m^2 und 350 g/m^2 ist lediglich die PmB-modifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 in der Lage, den Schichtenverbund zu verbessern. Alle anderen verwendeten Vorspritzmittel wirken sich – mit Ausnahme des Haftklebers bei einer Dosierung von 150 g/m^2 – ungünstig auf das Ergebnis der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner aus.

Bei einer frischen Asphaltbinderoberfläche und bei der Verwendung von Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 45 A kann bei der Verwendung der PmB-modifizierten Bitumenemulsion als Vorspritzmittel eine tendenzielle Verbesserung der Scherkraft beobachtet werden.

Der Haftkleber wirkt sich auf die Scherkraft ungünstig aus – je größer die Vorspritzmenge, umso geringer die Scherkraft. Die Bitumenemulsion U 60 K übt praktisch keinen Einfluss auf die Scherkraft aus, erst bei einer Menge von 350 g/m^2 wird die Scherkraft ebenfalls geringer.

Wird Asphaltbeton 0/11 S mit 50/70 als Deckschichtasphalt verwendet, begünstigt das Vorspritzmittel U 60 K - C2 den Schichtenverbund nach Leutner bei einer frischen Asphaltbinderoberfläche. Bei einer ausgemagerten Asphaltbinderoberfläche begünstigen alle verwendeten Vorspritzmittel sowohl die Haftzugfestigkeit als auch den Schichtenverbund nach Leutner.

Insbesondere bei ausgemagerten Asphaltbinderoberflächen sind Bitumenemulsionen vorzuziehen, da hier das Lösemittel des Haftklebers nicht wirken kann. Sowohl für

die Haftzugfestigkeit, als auch für die Scherkraft wurden tendenziell Vorteile bei der Verwendung der PmB-modifizierten Bitumenemulsion U 60 K- C2 gemessen. Bei einer frischen Asphaltbinderoberfläche ist die Verwendung der Bitumenemulsion U 60 K nicht zu empfehlen, da geringere Scherkräfte gemessen wurden, als ohne Vorspritzmittel.

Wird Splittmastixasphalt 0/8 mit PmB 45 A als Deckschichtasphalt verwendet, üben die verwendeten Vorspritzmittel auf der frischen Oberfläche eines Asphaltbinders 0/16 S mit PmB 45 A einen nur tendenziellen Einfluss auf den Schichtenverbund aus.

Es zeigt sich anhand der Haftzugprüfung sogar, dass die verwendeten Vorspritzmittel den Verbund ungünstig beeinflussen. Es kann ebenfalls festgestellt werden, dass hinsichtlich des Schichtenverbundes die PmB-modifizierte Bitumenemulsion U 60 K - C2 im Vergleich der beiden anderen Vorspritzmittel tendenziell günstiger abschneidet.

Bei den Kompaktasphaltsystemen – Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm – versagt bei den Haftzugversuchen das schwächste Glied im System – im seltensten Fall ist dies die Schichtgrenze. Vergleichbares kann trotz der versuchstechnisch festgelegten Scherebene beim Schichtenverbund nach Leutner gemessen werden.

Beim Haftzugversuch kann dieser Effekt deutlich anhand der Bruchfläche erkannt werden. Beim Prüfverfahren Schichtenverbund nach Leutner lässt sich dieser Effekt nur vermuten, die Ergebnisse deuten allerdings darauf hin (geringe Scherkräfte beim System mit Asphaltbeton, höhere Scherkräfte beim System mit Splittmastixasphalt).

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit gemäß der ALP-A, Teil 9 [14] hat sich zur Beurteilung des Schichtenverbundes als geeignet erwiesen. Voraussetzung dafür ist ein erfolgter Bruch an der Schichtgrenze.

Erfolgt der Bruch nicht an der Schichtgrenze, sondern in der Unterlage oder in zu gering verdichteten Schichten ist der Messwert zur Beurteilung des Schichtenverbundes nicht geeignet. Die tatsächliche Haftzugfestigkeit in der Schichtgrenze ist dann auf jeden Fall höher, als der gemessene Wert. Insbesondere bei zu gering ver-

dichteten Asphaltsschichten wurde ein Bruch innerhalb dieser Asphaltsschichten verstärkt beobachtet.

Bei vergleichbaren Vorspritzmitteln, Vorspritzmittelmengen sowie Asphaltssorten erreichen die im Labor hergestellten Systeme höhere Scherfestigkeiten, als die aus der Straße entnommenen Bohrkernproben.

Da für die unterschiedlichen Vorspritzmittel sowohl an den Ausbauproben, als auch an den labortechnisch hergestellten Proben gleiche Tendenzen gemessen wurden, kann das labortechnische Herstellverfahren Heiß-auf-kalt der Asphaltssysteme als praxisadäquat bezeichnet werden.

Alle Asphaltssysteme mit Splittmastixasphalt 0/8 S (PmB 45 A) als Deckschicht weisen ein erheblich günstigeres Verformungsverhalten auf, als die Systeme mit Asphaltbeton 0/11 S (50/70) als Deckschicht.

Sowohl Spurbildungsversuch, als auch dynamischer Stempeleindringversuch bestätigen beide erwartungsgemäß das Verformungsverhalten der Asphaltssysteme.

Anhand der Ergebnisse der Spurbildungsversuche und der dynamischen Stempeleindringversuche müssen hinsichtlich des Verformungsverhaltens alle untersuchten Systeme mit Splittmastixasphalt 0/8 S als Deckschicht als gleichwertig beurteilt werden.

Da weder der Spurbildungsversuch, noch der dynamische Stempeleindringversuch statistisch signifikante Unterschiede im Verformungsverhalten der Asphaltssysteme mit Splittmastixasphalt aufzeigen, muss davon ausgegangen werden, dass die unterschiedlichen Herstellverfahren sowie die unterschiedlichen Vorspritzmittel keinen Einfluss auf das Verformungsverhalten ausüben, bzw. dass diese Einflüsse mit den verwendeten Versuchen wegen der fehlenden Schubbeanspruchung prüftechnisch nicht angesprochen werden können.

Die Ergebnisse der Spurbildungsversuche zeigen beim Asphaltbeton 0/11 S als Deckschicht tendenziell ein günstigeres Verformungsverhalten für die Variante mit der PmB-modifizierten Bitumenemulsion U 60 K - C2, sowie für die Varianten Heiß-auf-heiß und Heiß-auf-warm.

Leider bestätigt der dynamische Stempeleindringversuch diese Tendenz nicht. Hier sind praktisch keine Unterschiede im Verformungsverhalten festzustellen.

Die Verwendung von 150 g/m² Haftkleber hat tendenziell einen positiven Einfluss auf den Schichtenverbund beim Asphaltbeton 0/11 S als Deckschicht. Beim Splittmastixasphalt 0/8 S wird der Schichtenverbund eher ungünstig beeinflusst.

Lediglich bei den bewitterten Varianten kann beim Asphaltbeton ein geringfügig verbesserter Verbund festgestellt werden – beim Splittmastixasphalt dagegen nicht. Für die Ergebnisse der bewitterten Varianten muss festgehalten werden, dass die Vorspritzmenge für diese Untersuchungen nicht optimiert wurde. Streng genommen können diese Ergebnisse daher nicht uneingeschränkt auf Systeme übertragen werden, die mit einer optimierten Vorspritzmenge auf bewitterten Oberflächen hergestellt werden. Dies gilt ebenfalls für die bewitterten Varianten mit den Vorspritzmitteln U 60 K und U 60 K – C2. In diesem Zusammenhang muss aber darauf hingewiesen werden, dass die bewitterten Varianten bereits zusätzlich zum Untersuchungsprogramm aufgenommen wurden und der Zeitrahmen eine weitere Optimierung der Vorspritzmenge nicht zuließ.

Die Verwendung von 150 g/m² Bitumenemulsion U 60 K hat tendenziell einen ungünstigen Einfluss auf den Schichtenverbund – unabhängig von dem in diesen Untersuchungen verwendeten Deckschichtasphalt.

Bei den bewitterten Varianten wird lediglich beim Asphaltbeton der Schichtenverbund deutlich verbessert – beim Splittmastixasphalt 0/8 S dagegen nicht.

Die Verwendung von 150 g/m² Bitumenemulsion U 60 K – C2 begünstigt tendenziell den Schichtenverbund. Beim Asphaltbeton ist diese Tendenz deutlicher als beim Splittmastixasphalt.

Gleiches gilt bei den bewitterten Varianten. Auch hier ist beim Asphaltbeton eine deutliche Verbesserung, beim Splittmastixasphalt eine lediglich tendenzielle Verbesserung des Schichtenverbunds festzustellen.

Für die Praxis steht nun eine Prüfsystematik zur Verfügung, um den Schichtenverbund bereits im Rahmen der Eignungsprüfung zu bestimmen und am Gesamtsystem hinsichtlich der Vorspritzmenge in Abhängigkeit des Vorspritzmittels und der vorgesehenen Asphaltarten und -sorten zu optimieren.

5.2 Offen gebliebene Fragen und Anregungen für weitere Forschungsarbeiten

Die Optimierung der Anspritzmittelmenge erfolgte an den frisch hergestellten Asphaltbinderplatten. Eine Variation der Anspritzmittelmenge bei den zusätzlich zum Prüfprogramm hergestellten, bewitterten Varianten erfolgte nicht. Daher muss davon ausgegangen werden, dass mit der verwendeten Anspritzmittelmenge bei den bewitterten Varianten nicht der optimale Verbund hergestellt werden konnte und sich die Ergebnisse nach einer Optimierung verschieben können. Darüber hinaus wurde die Ausmagerung der Asphaltbinderoberfläche modellhaft durchgeführt und kann nicht das Spektrum zwischen verschmutzter Oberfläche bis zur abgefrästen Fahrbahn abdecken.

Es wäre danach wünschenswert, unterschiedliche Oberflächenzustände und -verschmutzungen praxisnah labortechnisch herzustellen und daran die Vorspritzmengen unterschiedlicher Mittel zu optimieren.

Die Bestimmung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den Prüfverfahren zur Beurteilung des Schichtenbundes und den Verformungseigenschaften der Systeme ist auf Grund der verwendeten optimierten Systeme in dieser Forschungsarbeit nicht praktikabel. Es könnten daher in einer weiteren Forschungsarbeit Systeme mit bewusst schlechtem Schichtenverbund hergestellt werden – auch unter Verwendung der o.g. Variationen der Oberflächenzustände – um ein Quantifizieren dieses Zusammenhangs zu ermöglichen. Gegebenenfalls sind auch Schichtensysteme mit einer „weichen“ Unterlage mit in die Untersuchungen einzubeziehen.

Darüber hinaus wäre es notwendig, die labortechnischen Prüfungen anhand von Prüfungen an Bohrkernproben aus Versuchsstrecken mit gleichen Asphalten, Vorspritzmitteln und Vorspritzmittelmengen umfassend zu verifizieren und dann die Empfehlungen des Merkblattes für Schichtenverbund, Nähte, Anschlüsse und Randausbildung von Verkehrsflächen aus Asphalt zu präzisieren.

Der Sachbearbeiter

Der Forschungsnehmer

(Dipl.-Ing. Thomas Lobach)

(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner)

6 Literatur

- [1] Grätz, B.; Suß, G.: Schichtenverbund – eine Analyse von Scherversuchen. Bitumen Heft 4 / 1983, S. 156 ff.
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: FGSV-Arbeitspapier Nr. 25 / B 5.1, Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt B 5.1 Einfluss des Schichtenverbundes auf das Verhalten von Asphaltbefestigungen, 1990
- [3] Weber, R.: Rißbildung in Asphaltstraßen als Folge mangelhaften Schichtenverbundes. Straßen- und Tiefbau Heft 10 / 1991, S. 6 ff.
- [4] Eisenmann, J.; Neumann, U.: Auswirkungen von Verbundstörungen auf die Spurrinnenbildung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 677, 1994
- [5] Freund, H.-J., Codjia, H., Vassiliou, K.: Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für das Prüfverfahren „Schichtenverbund nach Leutner“ und Bestimmung der Präzision, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 676, 1994
- [6] Raab, C.: Schichtenverbund: Ein wichtiger Faktor im Belagsbau. Strasse und Verkehr Heft 4 / 1995, S. 167 ff.
- [7] Metelmann, P., Beeken, G.: Über die Verwendung von Anspritzmitteln im Straßenbau, Straße und Autobahn, Heft 5/1979, S. 219 ff
- [8] Leutner, R.: Untersuchung des Schichtenverbundes beim bituminösen Oberbau. Bitumen Heft 3 / 1979, S. 84 ff.
- [9] Leutner, R.: Bedeutung und Bewertung des Schichtenverbundes im Asphaltstraßenbau. Vortrag gehalten auf dem „Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996“. Strasbourg.
- [10] Grätz, B., Stöckert, U.: Grundlagen zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 829, November 2001
- [11] Leutner, R., Renken, P., Büchler, S., Lobach, T.: Überprüfung der Eignung des dynamischen Stempелеindringversuches zur Beurteilung der Verformungseigenschaften von Asphalt und Schaffung eines Bewertungshintergrundes. Schlussbericht zum Forschungsprojekt 12522N der AiF e.V., Mai 2003
- [12] FGSV: Merkblatt für den Bau kompakter Asphaltbefestigungen, MKA, Ausgabe 2001
- [13] FGSV: Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner, Ausgabe 1999

- [14] FGSV: Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB Teil 9: Bestimmung der Haftzugfestigkeit von Dünnen Schichten im Heiß- und Kalteinbau, Ausgabe 2003
- [15] FGSV: Technische Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau TP A-StB, Teil: Spurbildungsversuch – Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad, Ausgabe 1997
- [16] FGSV: Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bindemittel für Oberflächenbehandlungen (mit bitumenhaltigen Bindemitteln), Ausgabe 1997 (TL PmOB)
- [17] FGSV: Merkblatt für Schichtenverbund, Nähte, Anschlüsse und Randausbildung von Verkehrsflächen aus Asphalt, M SNAR, Ausgabe 1998
- [18] FGSV: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2 Erkennen und Behandeln von Ausreißern, Ausgabe 2003
- [19] Sachs, L.: Angewandte Statistik, Springer-Verlag, Berlin, 5. Auflage, 1978
- [20] Weber, D.: Grundriß der biologischen Statistik, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 9. Auflage, 1986
- [21] Eisenhart, C.: Assumptions underlying the Analyses of Variance, Biometrics 3, 1951

ANHANG

- Anhang I Ergebnisse der Optimierungsversuche, Schichtenverbund nach Leutner
- Anhang II Ergebnisse der Untersuchung der Hohlraumverhältnisse
- Anhang III Ergebnisse der Prüfungen zur Beurteilung des Schichtenverbundes
Schichtenverbund nach Leutner, Haftzugprüfung
- Anhang IV Ergebnisse der Prüfungen zur Beurteilung des Verformungsverhaltens
Spurbildungsversuche, dynamische Stempeleindringversuche
- Anhang V Ergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkernproben der
Versuchsstrecke L 390
- Anhang VI Ergebnisse der Prüfungen zur Beurteilung des Schichtenverbundes
an bewitterten Varianten – Schichtenverbund nach Leutner,
Haftzugprüfung

ANHANG I

Ergebnisse der Optimierungsversuche, Schichtenverbund nach Leutner

System	Haftbrücke	Dosierung					
		150 g/m ²		250 g/m ²		350 g/m ²	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	Haftkleber	67,16	2,6	53,10	2,3	54,14	2,1
		57,96	2,4	57,60	2,1	54,08	2,2
		62,72	2,2	58,00	2,3	55,74	2,0
	$\bar{x}$	62,61	2,4	56,23	2,2	53,25	2,1
	s	4,6009	0,20	2,7209	0,12	2,9982	0,10
	U 60 K	57,73	2,4	51,00	2,7	51,26	2,5
		54,48	2,4	49,78	2,6	48,54	2,5
		59,16	2,7	52,50	2,6	45,54	1,7
	$\bar{x}$	57,12	2,5	51,09	2,6	48,45	2,2
	s	2,3983	0,17	1,3625	0,06	2,8600	0,42
	U 60 K (C2) gem. PmOB	67,44	2,6	64,58	2,6	68,70	2,6
		66,75	2,9	63,10	2,4	64,00	2,8
		(56,59)	(2,3)	62,73	2,6	62,89	2,7
	$\bar{x}$	67,10	2,8	63,47	2,5	65,20	2,7
	s	0,4879	0,21	0,9789	0,12	3,0843	0,10
Tabelle A.1: Ergebnisse der Optimierungsversuche Schichtenverbund nach Leutner AB 0/11 S auf ABi 0/16 S							

System	Haftbrücke	Dosierung					
		150 g/m ²		250 g/m ²		350 g/m ²	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Splittmastixasphalt 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	Haftkleber	54,95	2,1	52,90	2,0	53,35	2,2
		54,84	2,0	53,35	2,2	43,25	1,8
		55,03	2,1	50,78	2,0	48,67	2,0
	$\bar{x}$	54,94	2,1	52,34	2,1	48,42	2,0
	s	0,0954	0,06	1,3725	0,12	5,0545	0,20
	U 60 K	54,50	2,1	59,92	2,5	55,25	2,6
		57,17	2,3	54,10	2,4	56,70	2,7
		58,14	2,2	-	-	53,42	2,2
	$\bar{x}$	56,60	2,2	57,01	2,5	55,12	2,5
	s	1,8850	0,10	4,1154	0,07	1,6437	0,25
	U 60 K (C2) gem. PmOB	58,38	2,1	56,56	2,4	55,14	2,5
		60,47	2,6	56,99	2,6	56,09	2,5
		54,10	2,3	59,50	2,3	56,85	2,3
	$\bar{x}$	57,65	2,3	57,68	2,4	56,03	2,4
	s	3,2471	0,25	1,5879	0,15	0,8568	0,12
Tabelle A.2: Ergebnisse der Optimierungsversuche Schichtenverbund nach Leutner SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S							

ANHANG II

Ergebnisse der Untersuchung der Hohlraumverhältnisse

Asphaltbeton 0/11 S					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,649	2,546	2,5393	4,14	99,74
2			2,5529	3,63	100,27
3			2,5479	3,82	100,07
4			2,5492	3,77	100,13
5			2,5504	3,72	100,17
6			2,5444	3,95	99,94
7			2,5502	3,73	100,16
8			2,5493	3,76	100,13
9			2,5273	4,59	99,27
$\bar{x}$			2,5457	3,90	99,99
S			0,0079	0,3001	0,3122

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,6020	2,69	101,76
2			2,5903	3,13	101,30
3			2,5607	4,24	100,14
4			2,5926	3,04	101,39
5			2,6273	1,75	102,75
6			2,5965	2,90	101,54
7			2,5655	4,06	100,33
8			2,5871	3,25	101,18
9			2,5862	3,28	101,14
$\bar{x}$			2,5898	3,15	101,28
S			0,0196	0,7321	0,7656

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5370	5,12	99,22
2			2,5914	3,09	101,35
3			2,5424	4,92	99,43
4			2,5487	4,69	99,68
5			2,5934	3,01	101,42
6			2,5667	4,01	100,38
7			2,5494	4,66	99,70
8			2,5466	4,76	99,59
9			2,5629	4,15	100,23
$\bar{x}$			2,5598	4,27	100,11
S			0,0207	0,7724	0,8078

Tabelle A.3: Prüfung der Hohlraumverhältnisse Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S, heiß-auf-kalt					
--	--	--	--	--	--

Asphaltbeton 0/11 S					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,649	2,546	2,5039	5,48	98,35
2			2,4912	5,96	97,85
3			2,4987	5,67	98,14
4			2,4878	6,09	97,71
5			2,4929	5,89	97,91
6			2,5250	4,68	99,18
7			2,5483	3,80	100,09
8			2,5159	5,02	98,82
9			2,5276	4,58	99,28
$\bar{x}$			2,5101	5,24	98,59
S			0,0204	0,7713	0,8025

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,6277	1,73	102,76
2			2,6372	1,38	103,14
3			2,6162	2,16	102,32
4			2,6298	1,65	102,85
5			2,6219	1,95	102,54
6			2,6237	1,88	102,61
7			2,6220	1,94	102,54
8			2,6254	1,82	102,68
9			2,6423	1,19	103,34
$\bar{x}$			2,6274	1,74	102,75
S			0,0081	0,3034	0,3172

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5754	3,69	100,72
2			2,6152	2,20	102,28
3			2,5939	3,00	101,44
4			2,5947	2,97	101,47
5			2,6166	2,15	102,33
6			2,5833	3,39	101,03
7			2,5708	3,86	100,54
8			2,6103	2,38	102,08
9			2,5755	3,68	100,72
$\bar{x}$			2,5929	3,03	101,40
S			0,0179	0,6684	0,6990

Tabelle A.4: Prüfung der Hohlraumverhältnisse Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S, heiß-auf-warm					
--	--	--	--	--	--

Asphaltbeton 0/11 S					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,649	2,546	2,5062	5,39	98,44
2			2,4809	6,35	97,44
3			2,4899	6,01	97,80
4			2,4867	6,13	97,67
5			2,4933	5,88	97,93
6			2,4899	6,01	97,80
7			2,5018	5,56	98,26
8			2,4938	5,86	97,95
9			2,5053	5,42	98,40
$\bar{x}$			2,4942	5,84	97,97
S			0,0086	0,3259	0,3390

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5951	2,95	101,49
2			2,6021	2,69	101,76
3			2,5790	3,55	100,86
4			2,6125	2,30	102,17
5			2,6303	1,63	102,87
6			2,5855	3,31	101,11
7			2,5765	3,65	100,76
8			2,5545	4,47	99,90
9			2,5957	2,93	101,51
$\bar{x}$			2,5924	3,05	101,38
S			0,0220	0,8224	0,8601

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,4954	6,68	97,59
2			2,5304	5,37	98,96
3			2,5032	6,39	97,90
4			2,4747	7,45	96,78
5			2,5686	3,94	100,45
6			2,4978	6,59	97,68
7			2,4775	7,35	96,89
8			2,5410	4,97	99,37
9			2,4847	7,08	97,17
$\bar{x}$			2,5081	6,20	98,09
S			0,0319	1,1922	1,2468

Tabelle A.5: Prüfung der Hohlraumverhältnisse
Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S, heiß-auf-heiß

Splittmastix 0/8 S					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,570	2,465	2,4587	4,33	99,74
2			2,4700	3,89	100,20
3			2,4422	4,97	99,08
4			2,4735	3,75	100,34
5			2,4847	3,32	100,80
6			2,4631	4,16	99,92
7			2,4633	4,15	99,93
8			2,4802	3,49	100,62
9			2,4463	4,81	99,24
$\bar{x}$			2,4647	4,10	99,99
S			0,0143	0,5556	0,5793

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5638	4,12	100,27
2			2,5794	3,54	100,88
3			2,5808	3,49	100,93
4			2,5671	4,00	100,39
5			2,5800	3,52	100,90
6			2,5860	3,29	101,13
7			2,5016	6,45	97,83
8			2,5651	4,07	100,32
9			2,5561	4,41	99,96
$\bar{x}$			2,5644	4,10	100,29
S			0,0256	0,9557	0,9994

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5605	4,24	100,14
2			2,5784	3,58	100,84
3			2,5482	4,70	99,66
4			2,5755	3,68	100,72
5			2,5780	3,59	100,82
6			2,5686	3,94	100,45
7			2,5344	5,22	99,12
8			2,5535	4,51	99,86
9			2,5652	4,07	100,32
$\bar{x}$			2,5625	4,17	100,21
S			0,0149	0,5587	0,5843

Tabelle A.6: Prüfung der Hohlraumverhältnisse Splittmastix 0/8 S auf Asphaltbinder 0/16 S, heiß-auf-kalt					
---	--	--	--	--	--

Splittmastix 0/8 S					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,570	2,465	2,3522	8,47	95,42
2			2,4151	6,03	97,98
3			2,3892	7,04	96,92
4			2,4128	6,12	97,88
5			2,4041	6,46	97,53
6			2,4141	6,07	97,94
7			2,4523	4,58	99,48
8			2,4010	6,58	97,40
9			2,3975	6,71	97,26
$\bar{x}$			2,4043	6,45	97,54
S			0,0264	1,0284	1,0722

Asphaltbinder 0/16 S – oberer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,6265	1,78	102,72
2			2,6189	2,06	102,42
3			2,6086	2,45	102,02
4			2,6312	1,60	102,90
5			2,6367	1,39	103,12
6			2,6336	1,51	103,00
7			2,6217	1,96	102,53
8			2,6216	1,96	102,53
9			2,6122	2,31	102,16
$\bar{x}$			2,6234	1,89	102,60
S			0,0095	0,3553	0,3716

Asphaltbinder 0/16 S – unterer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5732	3,77	100,63
2			2,5919	3,07	101,36
3			2,6379	1,35	103,16
4			2,5736	3,75	100,65
5			2,6145	2,23	102,25
6			2,5565	4,39	99,98
7			2,5699	3,89	100,50
8			2,5928	3,04	101,40
9			2,5784	3,58	100,84
$\bar{x}$			2,5876	3,23	101,20
S			0,0252	0,9412	0,9843

Tabelle A.7: Prüfung der Hohlraumverhältnisse Splittmastix 0/8 S auf Asphaltbinder 0/16 S, heiß-auf-warm					
---	--	--	--	--	--

Splittmastix 0/8 S					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,570	2,465	2,4289	5,49	98,54
2			2,4322	5,36	98,67
3			2,4162	5,98	98,02
4			2,4298	5,46	98,57
5			2,4171	5,95	98,06
6			2,4214	5,78	98,23
7			2,4391	5,09	98,95
8			2,4251	5,64	98,38
9			2,4302	5,44	98,59
$\bar{x}$			2,4267	5,58	98,44
S			0,0074	0,2898	0,3021
Asphaltbinder 0/16 S – oberer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5783	3,58	100,83
2			2,6317	1,58	102,92
3			2,5797	3,53	100,89
4			2,6042	2,61	101,85
5			2,6188	2,06	102,42
6			2,6019	2,70	101,76
7			2,5913	3,09	101,34
8			2,6040	2,62	101,84
9			2,5828	3,41	101,01
$\bar{x}$			2,5992	2,80	101,65
S			0,0182	0,6799	0,7110
Asphaltbinder 0/16 S – unterer Schichthorizont					
Nummer Einzelstück	Rohdichte [g/cm³]	Bezugsraumdichte [g/cm³]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [%]
1	2,674	2,557	2,5098	6,14	98,15
2			2,5527	4,54	99,83
3			2,4832	7,14	97,11
4			2,5196	5,77	98,54
5			2,5407	4,99	99,36
6			2,5165	5,89	98,42
7			2,4261	9,27	94,88
8			2,5329	5,28	99,06
9			2,4831	7,14	97,11
$\bar{x}$			2,5072	6,24	98,05
S			0,0385	1,4383	1,5041

Tabelle A.8: Prüfung der Hohlraumverhältnisse
Splittmastix 0/8 S auf Asphaltbinder 0/16 S, heiß-auf-heiß

ANHANG III

Ergebnisse der Prüfungen zur Beurteilung des Schichtenverbundes
Schichtenverbund nach Leutner
Haftzugprüfung

Schichtensystem		Verbundsystem			
		A10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel		A11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm ²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	63,88	1,96	67,16	2,57
	x ₂	58,51	2,24	57,96	2,41
	x ₃	62,40	3,32	62,72	2,16
	$\bar{x}$	61,60	2,51	62,61	2,38
	s	2,7737	0,7181	4,6009	0,2066
		Verbundsystem			
		A12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm ²)		A13 – Heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/cm ²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	57,73	2,41	67,44	2,57
	x ₂	54,48	2,41	66,75	2,86
	x ₃	59,16	2,66	63,04	2,50
	$\bar{x}$	57,12	2,49	65,74	2,64
	s	2,3983	0,1443	2,3664	0,1909
		Verbundsystem			
		A20 – Heiß-auf-warm (80 °C)		A30 – Heiß-auf-heiß	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	48,30	3,00	55,97	3,17
	x ₂	48,15	2,55	58,78	3,07
	x ₃	52,43	2,86	54,08	3,24
	$\bar{x}$	49,63	2,80	56,28	3,16
	s	2,4289	0,2303	2,3650	0,0854
Tabelle A.9: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner AB 0/11 S auf ABi 0/16 S					

Schichtensystem		A10 – Heiß-auf-kalt			
		AB 0/11 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	41,34	3,92	50,20	4,33
	x ₂	52,68	3,17	65,13	3,67
	x ₃	40,86	3,25	47,96*	-
	$\bar{x}$	44,96	3,45	54,43	4,00
	s	6,6900	0,4119	9,3339	0,4667
		A20 – Heiß-auf-warm (80 °C)			
		AB 0/11 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	27,10	4,00	66,03	3,25
	x ₂	30,34	3,67	60,12	3,42
	x ₃	28,15	3,75	61,62	3,17
	$\bar{x}$	28,53	3,81	62,59	3,28
	s	1,6531	0,1721	3,0721	0,1277
		A30 – Heiß-auf-heiß			
		AB 0/11 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	37,13	6,41	65,76	3,67
	x ₂	32,14	3,92	65,66	3,50
	x ₃	37,62	2,83	68,66	3,42
	$\bar{x}$	35,63	4,39	66,69	3,53
	s	3,0323	1,8351	1,7039	0,1277
Tabelle A.10: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner AB 0/11 S auf ABi 0/16 S - Innerhalb der Schichten -					

Schichtensystem		Verbundsystem			
		S10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel		S11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm ²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Splittmastix 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	53,64	2,46	54,95	2,08
	x ₂	58,80	2,08	54,84	1,99
	x ₃	57,80	2,57	55,03	2,08
	$\bar{x}$	56,75	2,37	54,94	2,05
	s	2,7365	0,2571	0,0954	0,0520
		Verbundsystem			
		S12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm ²)		S13 – Heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/cm ²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	54,50	2,08	58,38	2,08
	x ₂	58,14	2,19	54,10	2,32
	x ₃	57,17	2,29	60,47	2,62
	$\bar{x}$	56,60	2,19	57,65	2,34
	s	1,8550	0,1050	3,2471	0,2706
		Verbundsystem			
		S20 – Heiß-auf-warm (80 °C)		S30 – Heiß-auf-heiß	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	64,47	3,24	58,09	3,32
	x ₂	61,57	3,07	61,09	3,24
	x ₃	59,02	3,07	60,44	3,50
	$\bar{x}$	61,69	3,13	59,87	3,35
	s	2,7320	0,0981	1,5782	0,1332
Tabelle A.11: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S					

Schichtensystem		S10 – Heiß-auf-kalt			
		SMA 0/8 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Splittmastix 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	40,04	4,00	64,58	4,41
	x ₂	46,11	3,42	62,47	3,92
	x ₃	41,68	4,58	63,45	3,42
	$\bar{x}$	42,61	4,00	63,50	3,92
	s	3,1400	0,5800	1,0559	0,4950
		S20 – Heiß-auf-warm (80 °C)			
		SMA 0/8 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	31,74	5,00	50,62	3,50
	x ₂	26,64	4,66	59,76	2,83
	x ₃	23,41*	6,25	63,16	3,58
	$\bar{x}$	27,26	5,30	57,85	3,30
	s	4,1998	0,8373	6,4853	0,4119
		S30 – Heiß-auf-heiß			
		SMA 0/8 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	32,83	4,75	55,79*	4,58
	x ₂	25,12*	5,41	64,01*	3,75
	x ₃	34,14	4,00	57,19	3,58
	$\bar{x}$	30,70	4,72	59,00	3,97
	s	4,8737	0,7055	4,3977	0,5351
Tabelle A.12: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S - Innerhalb der Schichten -					

Schichtensystem		A10 – Verbundsystem heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	17,98	99,0	2,34	C
	x ₂	18,49	99,1	2,40	C
	x ₃	19,40	98,7	2,54	C
	$\bar{x}$	18,62	-	2,43	-
	s	0,7193	-	0,1026	-
	A20 – Verbundsystem heiß-auf-warm (80 °C)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	25,13	98,7	3,28	A
	x ₂	25,59	98,7	3,34	A
	x ₃	25,35	98,7	3,31	B
	$\bar{x}$	25,36	-	3,31	-
	s	0,2301	-	0,0300	-
	A30 – Verbundsystem heiß-auf-heiß				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	23,47	99,0	3,05	E
	x ₂	25,51	98,7	3,33	A
	x ₃	25,82	98,7	3,37	A
	$\bar{x}$	24,93	-	3,25	-
	s	1,2767	-	0,1744	-
Tabelle A.13: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit AB 0/11 S auf ABi 0/16 S					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
E: innerhalb der Binderschicht
F: teils oder ganz in der Klebefläche

Schichtensystem		A11 – Verbundsystem heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/m²)			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	21,30	98,8	2,78	C
	x ₂	19,59	98,8	2,56	C
	x ₃	20,57	98,8	2,68	C
	$\bar{x}$	20,49	-	2,67	-
	s	0,8580	-	0,1102	-
	A12 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	21,91	99,0	2,85	C
	x ₂	19,69	99,0	2,56	C
	x ₃	17,70	99,0	2,30	B
	$\bar{x}$	19,77	-	2,57	-
	s	2,1060	-	0,2751	-
	A13 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	21,22	99,0	2,76	C
	x ₂	20,90	99,0	2,72	C
	x ₃	21,29	99,0	2,77	C
	$\bar{x}$	21,14	-	2,75	-
	s	0,2079	-	0,0265	-
Tabelle A.14: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit AB 0/11 S auf ABi 0/16 S					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
E: innerhalb der Binderschicht
F: teils oder ganz in der Klebefläche

Schichtensystem		S10 – Verbundsystem heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzug- festigkeit [N/mm²]	Bruch- klassifi- zierung
Splittmastix 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	18,55	99,0	2,41	C
	x ₂	19,02	99,0	2,47	C
	x ₃	20,43	99,1	2,65	C
	$\bar{x}$	19,33	-	2,51	-
	s	0,9784	-	0,1249	-
	S20 – Verbundsystem heiß-auf-warm (80 °C)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzug- festigkeit [N/mm²]	Bruch- klassifi- zierung
	x ₁	22,39	99,0	2,91	E
	x ₂	23,85	99,0	3,10	E
	x ₃	26,33	98,9	3,43	C
	$\bar{x}$	24,19	-	3,15	-
	s	1,9919	-	0,2631	-
	S30 – Verbundsystem heiß-auf-heiß				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzug- festigkeit [N/mm²]	Bruch- klassifi- zierung
	x ₁	25,24	98,8	3,29	E
	x ₂	22,40	98,8	2,92	E
	x ₃	18,74	98,8	2,44	E
	$\bar{x}$	22,13	-	2,88	-
	s	3,2586	-	0,4262	-
Tabelle A.15: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
 B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
 C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
 E: innerhalb der Binderschicht
 F: teils oder ganz in der Klebefläche

Schichtensystem		S11 – Verbundsystem heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/m²)			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
Splittmastixasphalt 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	16,76	98,7	2,19	C
	x ₂	16,57	98,7	2,17	C
	x ₃	16,50	98,7	2,16	C
	$\bar{x}$	16,61	-	2,17	-
	s	0,1345	-	0,0153	-
	S12 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	15,78	99,0	2,05	C
	x ₂	14,48	99,0	1,88	C
	x ₃	15,55	99,0	2,02	C
	$\bar{x}$	15,27	-	1,98	-
	s	0,6938	-	0,0907	-
	S13 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	18,67	99,0	2,43	C
	x ₂	16,07	99,0	2,09	C
	x ₃	19,26	99,1	2,50	C
	$\bar{x}$	18,00	-	2,34	-
	s	1,6973	-	0,2193	-
Tabelle A.16: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
E: innerhalb der Binderschicht
F: teils oder ganz in der Klebefläche

```

*****
Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal:  Schichtenverbund Leutner
                                                Scherkraft
                                                AB 0/11 S auf ABi 16 S
*****

```

```

Mittelwert der Gruppe A10 := 61.5967
Standardabweichung        := 2.7737
-----
Mittelwert der Gruppe A11 := 62.6133
Standardabweichung        := 4.6009
-----
Mittelwert der Gruppe A12 := 57.1233
Standardabweichung        := 2.3983
-----
Mittelwert der Gruppe A13 := 65.7467
Standardabweichung        := 2.3607
-----
Mittelwert der Gruppe A20 := 49.6267
Standardabweichung        := 2.4289
-----
Mittelwert der Gruppe A30 := 56.2767
Standardabweichung        := 2.3650
-----

```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert      = 58.8306   N = 18
Mittleres Mittel      = 58.8306
Q innerhalb           = 103.3582   ( FG2 = 12)
Q zwischen             = 491.8256   ( FG1 = 5)
Q gesamt               = 595.1837   ( FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen    = 5.7261
Stand.innerh.d.Gru     = 2.9348
Varianz.innerh.d.Gru  = 8.6132
Gesamtstandardabw.    = 5.9170

```

Testquotient $F^* = 11.42 > 3.11$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

```

*****
LSD-Test:

```

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
A13	3	65.7467	3.1333	5.2239	
A11	3	62.6133	1.0167	5.2239	
A10	3	61.5967	4.4733	5.2239	
A12	3	57.1233	0.8467	5.2239	
A30	3	56.2767	6.6500	5.2239	Grenze homogener Gruppen
A20	3	49.6267			

```

*****

```

```

*****
Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal:  Schichtenverbund Leutner
                                                Scherweg
                                                AB 0/11 S auf ABi 16 S
*****

```

```

Mittelwert der Gruppe A10 := 2.5067
Standardabweichung        := 0.7181
-----
Mittelwert der Gruppe A11 := 2.3800
Standardabweichung        := 0.2066
-----
Mittelwert der Gruppe A12 := 2.4933
Standardabweichung        := 0.1443
-----
Mittelwert der Gruppe A13 := 2.6433
Standardabweichung        := 0.1909
-----
Mittelwert der Gruppe A20 := 2.8033
Standardabweichung        := 0.2303
-----
Mittelwert der Gruppe A30 := 3.1600
Standardabweichung        := 0.0854
-----

```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert    = 2.6644   N = 18
Mittleres Mittel    = 2.6644
Q innerhalb         = 1.3521   ( FG2 = 12)
Q zwischen          = 1.2012   ( FG1 = 5)
Q gesamt            = 2.5532   ( FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen  = 0.2830
Stand.innerh.d.Gru  = 0.3357
Varianz.innerh.d.Gru = 0.1127
Gesamtstandardabw.  = 0.3875

```

Testquotient $F^* = 2.13 < 3.110000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

```

*****
LSD-Test:

```

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
A30	3	3.1600	0.3567	0.5975
A20	3	2.8033	0.1600	0.5975
A13	3	2.6433	0.1367	0.5975
A10	3	2.5067	0.0133	0.5975
A12	3	2.4933	0.1133	0.5975
A11	3	2.3800		

```

*****

```

```

*****
Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal:  Schichtenverbund Leutner
                                                Scherkraft
                                                SMA 0/8 S auf ABi 16 S
*****

```

```

Mittelwert der Gruppe S10 := 56.7467
Standardabweichung        := 2.7365
-----
Mittelwert der Gruppe S11 := 54.9400
Standardabweichung        := 0.0954
-----
Mittelwert der Gruppe S12 := 56.6033
Standardabweichung        := 1.8850
-----
Mittelwert der Gruppe S13 := 57.6500
Standardabweichung        := 3.2471
-----
Mittelwert der Gruppe S20 := 61.6867
Standardabweichung        := 2.7269
-----
Mittelwert der Gruppe S30 := 59.8733
Standardabweichung        := 1.5782
-----

```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert      = 57.9167   N = 18
Mittleres Mittel      = 57.9167
Q innerhalb           = 63.0429   ( FG2 = 12)
Q zwischen             = 90.2004   ( FG1 = 5)
Q gesamt              = 153.2433   ( FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen    = 2.4522
Stand.innerh.d.Gru    = 2.2921
Varianz.innerh.d.Gru  = 5.2536
Gesamtstandardabw.    = 3.0024

```

Testquotient $F^* = 3.43 > 3.11$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

```

*****
LSD-Test:

```

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
S20	3	61.6867	1.8133	4.0798
S30	3	59.8733	2.2233	4.0798
S13	3	57.6500	0.9033	4.0798
S10	3	56.7467	0.1433	4.0798
S12	3	56.6033	1.6633	4.0798
S11	3	54.9400		

```

*****

```

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Schichtenverbund Leutner
Scherweg
SMA 0/8 S auf ABl 16 S**

Mittelwert der Gruppe S10 := 2.3700
Standardabweichung := 0.2571

Mittelwert der Gruppe S11 := 2.0500
Standardabweichung := 0.0520

Mittelwert der Gruppe S12 := 2.1867
Standardabweichung := 0.1050

Mittelwert der Gruppe S13 := 2.3400
Standardabweichung := 0.2706

Mittelwert der Gruppe S20 := 3.1267
Standardabweichung := 0.0981

Mittelwert der Gruppe S30 := 3.3533
Standardabweichung := 0.1332

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert	=	2.5711	N = 18
Mittleres Mittel	=	2.5711	
Q innerhalb	=	0.3608	(FG2 = 12)
Q zwischen	=	4.3012	(FG1 = 5)
Q gesamt	=	4.6620	(FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen	=	0.5355	
Stand.innerh.d.Gru	=	0.1734	
Varianz.innerh.d.Gru	=	0.0301	
Gesamtstandardabw.	=	0.5237	

Testquotient $F^* = 28.61 > 3.11$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
S30	3	3.3533	0.2267	0.3086	
S20	3	3.1267	0.7567	0.3086	Grenze homogener Gruppen
S10	3	2.3700	0.0300	0.3086	
S14	3	2.3400	0.1533	0.3086	
S12	3	2.1867	0.1367	0.3086	
S11	3	2.0500			

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Haftzugfestigkeit**
AB 0/11 S auf ABi 0/16 S

```
Mittelwert der Gruppe A10 := 2.4267
Standardabweichung        := 0.1026
-----
Mittelwert der Gruppe A11 := 2.6733
Standardabweichung        := 0.1102
-----
Mittelwert der Gruppe A12 := 2.5700
Standardabweichung        := 0.2751
-----
Mittelwert der Gruppe A13 := 2.7500
Standardabweichung        := 0.0265
-----
Mittelwert der Gruppe A20 := 3.3100
Standardabweichung        := 0.0300
-----
Mittelwert der Gruppe A30 := 3.2500
Standardabweichung        := 0.1744
-----
```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```
Gesamtmittelwert    = 2.8300   N = 18
Mittleres Mittel    = 2.8300
Q innerhalb         = 0.2607   ( FG2 = 12)
Q zwischen          = 2.0041   ( FG1 = 5)
Q gesamt            = 2.2648   ( FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen  = 0.3655
Stand.innerh.d.Gru  = 0.1474
Varianz.innerh.d.Gru = 0.0217
Gesamtstandardabw.  = 0.3650
```

Testquotient $F^* = 18.45 > 3.11$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
A20	3	3.3100	0.0600	0.2624	
A30	3	3.2500	0.5000	0.2624	Grenze homogener Gruppen
A13	3	2.7500	0.0767	0.2624	
A11	3	2.6733	0.1033	0.2624	
A12	3	2.5700	0.1433	0.2624	
A10	3	2.4267			

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Haftzugfestigkeit**
SMA 0/8 S auf ABl 0/16 S

Mittelwert der Gruppe S10 := 2.5100
Standardabweichung := 0.1249

Mittelwert der Gruppe S11 := 2.1733
Standardabweichung := 0.0153

Mittelwert der Gruppe S12 := 1.9833
Standardabweichung := 0.0907

Mittelwert der Gruppe S13 := 2.3400
Standardabweichung := 0.2193

Mittelwert der Gruppe S20 := 3.1467
Standardabweichung := 0.2631

Mittelwert der Gruppe S30 := 2.8833
Standardabweichung := 0.4262

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert	=	2.5061	N = 18
Mittleres Mittel	=	2.5061	
Q innerhalb	=	0.6461	(FG2 = 12)
Q zwischen	=	2.8928	(FG1 = 5)
Q gesamt	=	3.5388	(FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen	=	0.4391	
Stand.innerh.d.Gru	=	0.2320	
Varianz.innerh.d.Gru	=	0.0538	
Gesamtstandardabw.	=	0.4563	

Testquotient $F^* = 10.75 > 3.11$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
S20	3	3.1467	0.2633	0.4130
S30	3	2.8833	0.3733	0.4130
S10	3	2.5100	0.1700	0.4130
S13	3	2.3400	0.1667	0.4130
S11	3	2.1733	0.1900	0.4130
S12	3	1.9833		

ANHANG IV

Ergebnisse der Prüfungen zur Beurteilung des Verformungsverhaltens

Spurbildungsversuche

Dynamische Stempeleindringversuche

Schichtensystem		Verbundsystem	
		A10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel	A11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm²)
		Spurrinnentiefe [mm]	Spurrinnentiefe [mm]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	4,70	5,17
	x ₂	6,25	4,51
	x ₃	5,74	4,84
	$\bar{x}$	5,90	4,84
	s	1,0649	0,3300
		Verbundsystem	
		A12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm²)	A13 – Heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/cm²)
		Spurrinnentiefe [mm]	Spurrinnentiefe [mm]
	x ₁	5,43	4,16
	x ₂	4,75	4,06
	x ₃	6,07	4,23
	$\bar{x}$	5,42	4,15
	s	0,6801	0,0854
		Verbundsystem	
		A20 – Heiß-auf-warm (80 °C)	A30 – Heiß-auf-heiß
		Spurrinnentiefe [mm]	Spurrinnentiefe [mm]
	x ₁	3,52	4,68
	x ₂	4,29	4,27
	x ₃	4,10	4,34
	$\bar{x}$	3,97	4,43
	s	0,4011	0,2193
Tabelle A.17: Ergebnisse der Spurbildungsversuche – Spurrinnentiefe [mm] AB 0/11 S auf ABi 0/16 S			

Schichtensystem		Verbundsystem	
		S10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel	S11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm²)
		Spurrinnentiefe [mm]	Spurrinnentiefe [mm]
Splittmastixasphalt 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	2,70	3,10
	x ₂	3,14	2,71
	x ₃	3,19	3,19
	$\bar{x}$	3,01	3,00
	s	0,2696	0,2551
		Verbundsystem	
		S12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm²)	S13 – Heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/cm²)
		Spurrinnentiefe [mm]	Spurrinnentiefe [mm]
	x ₁	2,76	3,00
	x ₂	2,65	2,85
	x ₃	3,15	2,97
	$\bar{x}$	2,85	2,94
	s	0,2627	0,0794
		Verbundsystem	
		S20 – Heiß-auf-warm (80 °C)	S30 – Heiß-auf-heiß
		Spurrinnentiefe [mm]	Spurrinnentiefe [mm]
	x ₁	2,94	3,16
	x ₂	3,05	2,77
	x ₃	3,04	3,17
	$\bar{x}$	3,01	3,03
	s	0,0608	0,2281
Tabelle A.18: Ergebnisse der Spurbildungsversuche – Spurrinnentiefe [mm] SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S			

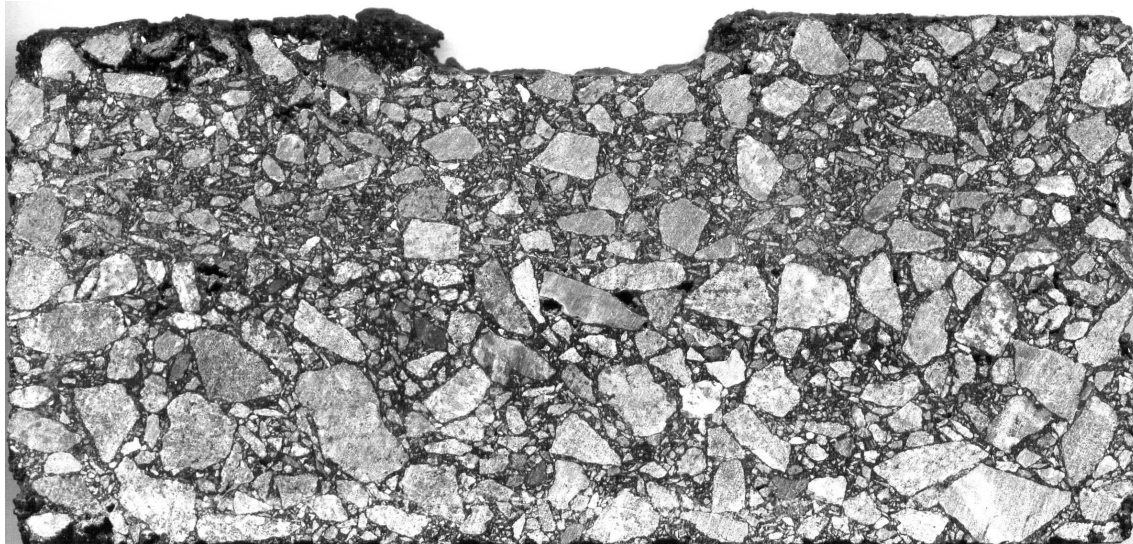


Abbildung A.1: Spurrinne nach 20.000 Überrollungen, System A10
AB 0/11 S auf ABi 0/16 S, Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel

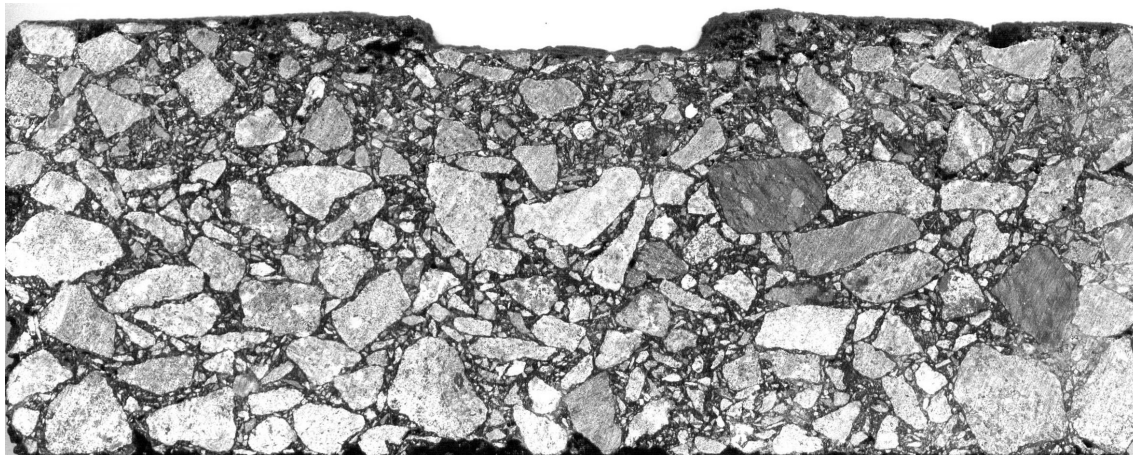


Abbildung A.2: Spurrinne nach 20.000 Überrollungen, System A20
AB 0/11 S auf ABi 0/16 S, Heiß-auf-warm

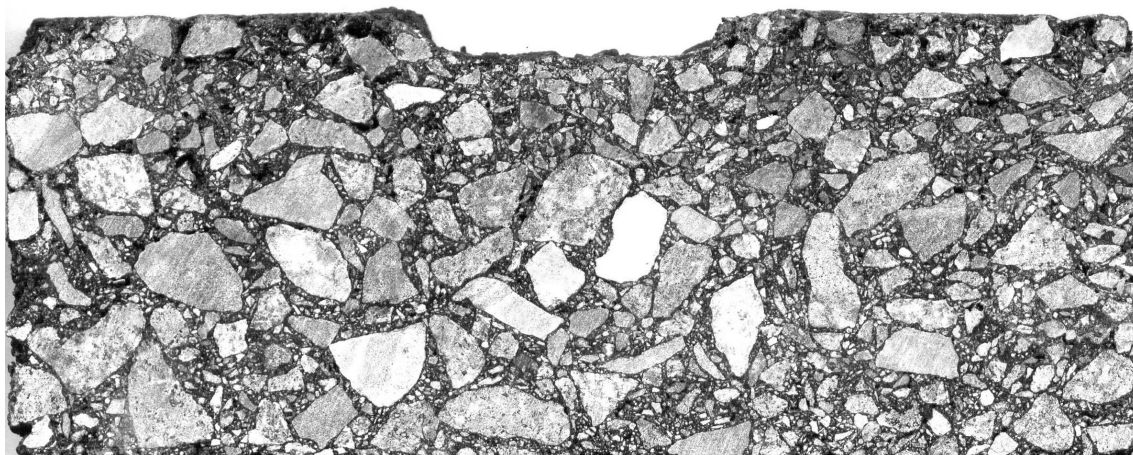


Abbildung A.3: Spurrinne nach 20.000 Überrollungen, System A30
AB 0/11 S auf ABi 0/16 S, Heiß-auf-heiß

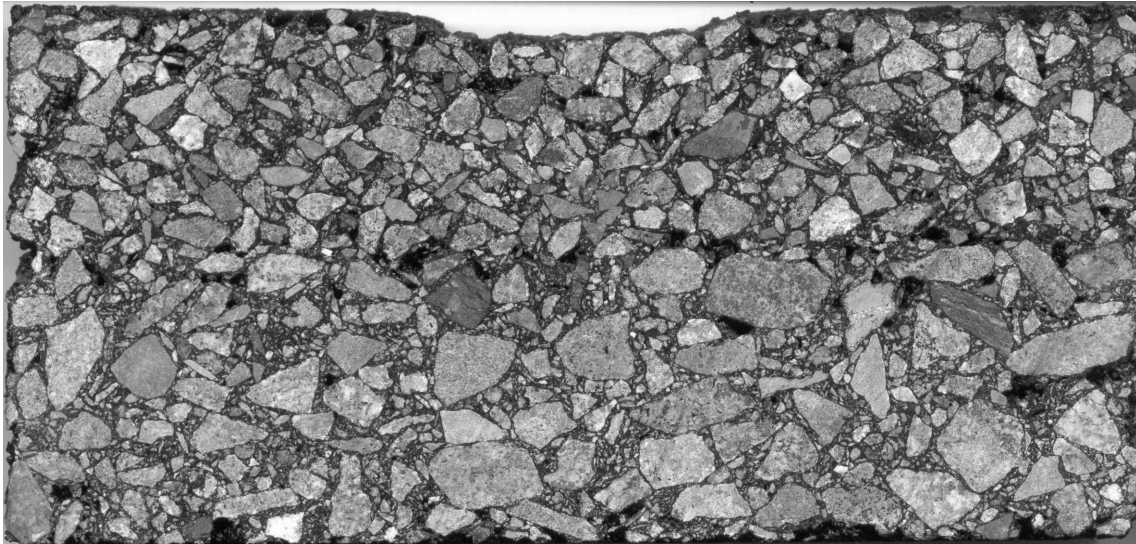


Abbildung A.4: Spurrinne nach 20.000 Überrollungen, System S10
SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S, Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel

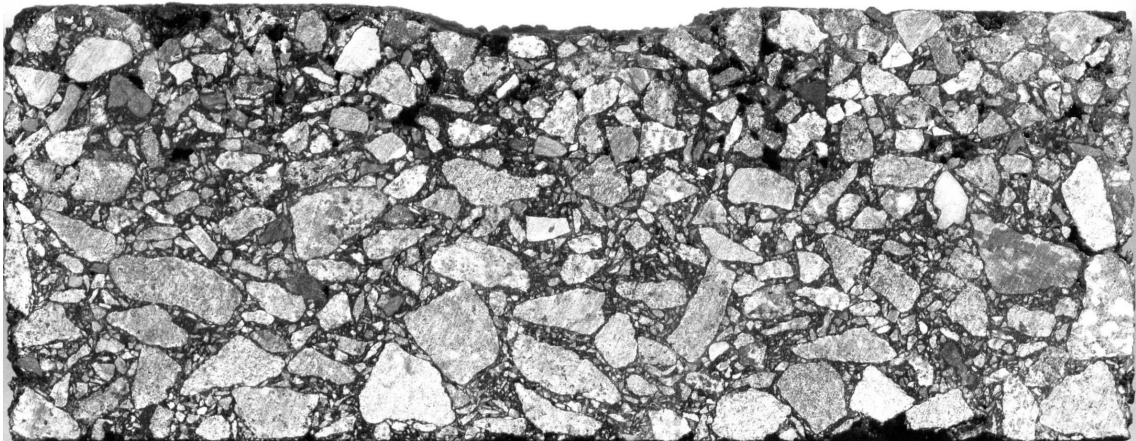


Abbildung A.5: Spurrinne nach 20.000 Überrollungen, System S20
SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S, Heiß-auf-warm



Abbildung A.6: Spurrinne nach 20.000 Überrollungen, System S30
SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S, Heiß-auf-heiß

Schichtensystem		Verbundsystem A10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	1,665	91,4	18,2129
	x ₂	1,800	91,1	19,7614
	x ₃	1,611	90,6	17,7793
	$\bar{x}$	1,692	-	18,5845
	s	0,0973	-	1,0420
		Verbundsystem A20 – Heiß-auf-warm		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
	x ₁	1,639	76,0	21,5646
	x ₂	1,610	75,6	21,2907
	x ₃	1,348	75,6	17,8268
	$\bar{x}$	1,532	-	20,2274
	s	0,1603	-	2,0835
		Verbundsystem A30 – Heiß-auf-heiß		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
	x ₁	1,686	76,8	21,9569
	x ₂	1,742	76,8	22,6790
	x ₃	1,538	76,8	20,0240
	$\bar{x}$	1,655	-	21,5533
	s	0,1054	-	1,3721
Tabelle A.19: Ergebnisse der dynamischen Stempелеindringversuche nach 10.000 Lastwechseln AB 0/11 S auf ABi 0/16 S				

Schichtensystem		Verbundsystem A11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm²)		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	1,696	91,2	18,6013
	x ₂	1,669	91,4	18,2611
	x ₃	1,674	91,1	18,3753
	$\bar{x}$	1,680	-	18,4126
	s	0,0144	-	0,1731
		Verbundsystem A12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm²)		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
	x ₁	1,746	90,9	19,2050
	x ₂	1,611	91,1	17,6841
	x ₃	1,727	90,8	19,0219
	$\bar{x}$	1,695	-	18,6370
	s	0,0731	-	0,8303
		Verbundsystem A13 – Heiß-auf-kalt U 60 K C2 (150 g/cm²)		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
	x ₁	1,623	91,2	17,7954
	x ₂	1,659	91,8	18,0697
	x ₃	1,705	91,0	18,7396
	$\bar{x}$	1,662	-	18,2016
	s	0,0411	-	0,4857
Tabelle A.20: Ergebnisse der dynamischen Stempелеindringversuche nach 10.000 Lastwechseln AB 0/11 S auf ABi 0/16 S				

Schichtensystem		Verbundsystem S10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
Splittmastixasphalt 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	1,278	94,8	13,4859
	x ₂	1,234	93,5	13,1949
	x ₃	1,437	93,8	15,3227
	$\bar{x}$	1,316	-	14,0012
	s	0,1068	-	1,1537
		Verbundsystem S20 – Heiß-auf-warm		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
	x ₁	1,557	76,5	20,3530
	x ₂	1,267	76,0	16,6763
	x ₃	1,372	76,4	17,9625
	$\bar{x}$	1,399	-	18,3306
	s	0,1468	-	1,8638
		Verbundsystem S30 – Heiß-auf-heiß		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindring- tiefe [‰]
	x ₁	1,493	78,2	19,0928
	x ₂	1,269	78,0	16,2722
	x ₃	1,420	78,1	18,1851
	$\bar{x}$	1,394	-	17,8500
	s	0,1142	-	1,4398
Tabelle A.21: Ergebnisse der dynamischen Stempeleindringversuche nach 10.000 Lastwechseln SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S				

Schichtensystem		Verbundsystem S11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm²)		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindringtiefe [‰]
Splittmastixasphalt 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	1,319	92,6	14,2447
	x ₂	1,214	92,6	13,1122
	x ₃	1,289	92,8	13,8936
	$\bar{x}$	1,274	-	13,7502
	s	0,0541	-	0,5797
		Verbundsystem S12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm²)		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindringtiefe [‰]
	x ₁	1,409	92,9	15,1694
	x ₂	1,296	92,7	13,9818
	x ₃	1,268	92,6	13,6980
	$\bar{x}$	1,323	-	14,2831
	s	0,0746	-	0,7806
		Verbundsystem S13 – Heiß-auf-kalt U 60 K C2 (150 g/cm²)		
		absolute Eindringtiefe [mm]	Probekörperhöhe [mm]	relative Eindringtiefe [‰]
	x ₁	1,311	92,6	14,1561
	x ₂	1,224	93,9	13,0348
	x ₃	1,229	92,9	13,2283
	$\bar{x}$	1,255	-	13,4731
	s	0,0489	-	0,5994
Tabelle A.22: Ergebnisse der dynamischen Stempелеindringversuche nach 10.000 Lastwechseln SMA 0/8 S auf ABI 0/16 S				

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Spurrinnentiefe**
AB 0/11 S auf ABi 0/16 S

```
Mittelwert der Gruppe A10 := 5.8967
Standardabweichung        := 1.0649
-----
Mittelwert der Gruppe A11 := 4.8400
Standardabweichung        := 0.3300
-----
Mittelwert der Gruppe A12 := 5.4167
Standardabweichung        := 0.6601
-----
Mittelwert der Gruppe A13 := 4.1500
Standardabweichung        := 0.0854
-----
Mittelwert der Gruppe A20 := 3.9700
Standardabweichung        := 0.4011
-----
Mittelwert der Gruppe A30 := 4.4300
Standardabweichung        := 0.2193
-----
```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```
Gesamtmittelwert    = 4.7839   N = 18
Mittleres Mittel    = 4.7839
Q innerhalb         = 3.7899   ( FG2 = 12)
Q zwischen          = 8.4939   ( FG1 = 5)
Q gesamt            = 12.2838  ( FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen  = 0.7525
Stand.innerh.d.Gru  = 0.5620
Varianz.innerh.d.Gru = 0.3158
Gesamtstandardabw.  = 0.8500
```

Testquotient $F^* = 5.38 > 3.11$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
A10	3	5.8967	0.4800	1.0003
A12	3	5.4167	0.5767	1.0003
A11	3	4.8400	0.4100	1.0003
A30	3	4.4300	0.2800	1.0003
A13	3	4.1500	0.1800	1.0003
A20	3	3.9700		

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Spurrinnentiefe**
SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S

Mittelwert der Gruppe S10 := 3.0100
Standardabweichung := 0.2696

Mittelwert der Gruppe S11 := 3.0000
Standardabweichung := 0.2551

Mittelwert der Gruppe S12 := 2.8533
Standardabweichung := 0.2627

Mittelwert der Gruppe S13 := 2.9400
Standardabweichung := 0.0794

Mittelwert der Gruppe S20 := 3.0100
Standardabweichung := 0.0608

Mittelwert der Gruppe S30 := 3.0333
Standardabweichung := 0.2281

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert	=	2.9744	N = 18
Mittleres Mittel	=	2.9744	
Q innerhalb	=	0.5377	(FG2 = 12)
Q zwischen	=	0.0675	(FG1 = 5)
Q gesamt	=	0.6052	(FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen	=	0.0671	
Stand.innerh.d.Gru	=	0.2117	
Varianz.innerh.d.Gru	=	0.0448	
Gesamtstandardabw.	=	0.1887	

Testquotient $F^* = 0.30 < 3.110000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
S30	3	3.0333	0.0233	0.3768
S20	3	3.0100	0.0000	0.3768
S10	3	3.0100	0.0100	0.3768
S11	3	3.0000	0.0600	0.3768
S13	3	2.9400	0.0867	0.3768
S12	3	2.8533		

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **dynamische Stempelein-
dringtiefe**
AB 0/11 S auf ABi 0/16 S

Mittelwert der Gruppe A10 := 1.6920
Standardabweichung := 0.0973

Mittelwert der Gruppe A11 := 1.6797
Standardabweichung := 0.0144

Mittelwert der Gruppe A12 := 1.6947
Standardabweichung := 0.0731

Mittelwert der Gruppe A13 := 1.6623
Standardabweichung := 0.0411

Mittelwert der Gruppe A20 := 1.5323
Standardabweichung := 0.1603

Mittelwert der Gruppe A30 := 1.6553
Standardabweichung := 0.1054

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert	=	1.6527	N = 18
Mittleres Mittel	=	1.6527	
Q innerhalb	=	0.1070	(FG2 = 12)
Q zwischen	=	0.0559	(FG1 = 5)
Q gesamt	=	0.1629	(FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen	=	0.0610	
Stand.innerh.d.Gru	=	0.0944	
Varianz.innerh.d.Gru	=	0.0089	
Gesamtstandardabw.	=	0.0979	

Testquotient $F^* = 1.25 < 3.110000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
A12	3	1.6947	0.0027	0.1681
A10	3	1.6920	0.0123	0.1681
A11	3	1.6797	0.0173	0.1681
A13	3	1.6623	0.0070	0.1681
A30	3	1.6553	0.1230	0.1681
A20	3	1.5323		

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **dynamische Stempel-
dringtiefe**
SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S

```
Mittelwert der Gruppe S10 := 1.3163
Standardabweichung        := 0.1068
-----
Mittelwert der Gruppe S11 := 1.2740
Standardabweichung        := 0.0541
-----
Mittelwert der Gruppe S12 := 1.3243
Standardabweichung        := 0.0746
-----
Mittelwert der Gruppe S13 := 1.2547
Standardabweichung        := 0.0489
-----
Mittelwert der Gruppe S20 := 1.3987
Standardabweichung        := 0.1468
-----
Mittelwert der Gruppe S30 := 1.3940
Standardabweichung        := 0.1142
-----
```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```
Gesamtmittelwert    = 1.3270    N = 18
Mittleres Mittel    = 1.3270
Q innerhalb         = 0.1138    ( FG2 = 12)
Q zwischen          = 0.0534    ( FG1 = 5)
Q gesamt            = 0.1672    ( FG = 17)
Stand.zw.d.Gruppen  = 0.0596
Stand.innerh.d.Gru  = 0.0974
Varianz.innerh.d.Gru = 0.0095
Gesamtstandardabw.  = 0.0992
```

Testquotient $F^* = 1.13 < 3.110000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.180$ mit $N-K=12$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
S20	3	1.3987	0.0047	0.1733
S30	3	1.3940	0.0697	0.1733
S12	3	1.3243	0.0080	0.1733
S10	3	1.3163	0.0423	0.1733
S11	3	1.2740	0.0193	0.1733
S13	3	1.2547		

ANHANG V

Ergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkernproben der Versuchsstrecke L 390

Schichtensystem		Verbundsystem heiß-auf-kalt Haftkleber (300 g/m²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S Bohrkernproben der Versuchsstrecke L370	x ₁	40,0	3,2
	x ₂	40,9	3,8
	x ₃	40,3	4,1
	$\bar{x}$	40,4	3,7
	s	0,4583	0,4583
		Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K (300 g/m²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	34,4	3,2
	x ₂	32,7	2,9
	x ₃	30,1	2,7
	$\bar{x}$	32,4	2,9
	s	2,1656	0,2517
		Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (300 g/m²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	40,0	4,4
	x ₂	42,4	3,7
	x ₃	38,5	4,1
	$\bar{x}$	40,3	4,1
	s	1,9672	0,3512
Tabelle A.23: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner an den Bohrkerproben der Teststrecke L 370 Asphaltbeton 0/11 S auf Asphaltbinder 0/16 S			

Schichtensystem		Verbundsystem heiß-auf-kalt Haftkleber (300 g/m²)			
		AB 0/11 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S	x ₁	41,92	4,9	61,99	2,9
	x ₂	39,01	4,7	53,82	2,9
	x ₃	39,61	5,0	53,57	3,0
	$\bar{x}$	40,18	4,9	56,46	2,9
	s	1,5362	0,1528	4,7908	0,0577
		Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K (300 g/m²)			
		AB 0/11 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	37,13	4,8	30,55	2,3
	x ₂	Proben für Mischgut- analyse verwendet		Proben für Mischgut- analyse verwendet	
	x ₃				
	$\bar{x}$	37,13	4,8	30,55	2,3
	s	-	-	-	-
		Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (300 g/m²)			
		AB 0/11 S		ABi 0/16 S	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	38,33	4,1	32,83	2,3
	x ₂	41,16	3,8	49,76	3,4
	x ₃	38,96	4,2	44,84	3,9
	$\bar{x}$	39,48	4,0	42,48	3,2
	s	1,4858	0,2082	8,7089	0,8185
Tabelle A.24: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner an den Bohrkernproben der Teststrecke L 370 - Innerhalb der Schichten -					

Schichtensystem		Verbundsystem heiß-auf-kalt Haftkleber (300 g/m ²)			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S Bohrkernproben der Versuchsstrecke L370	x ₁	16,45	98,8	2,15	E
	x ₂	18,27	98,9	2,38	C
	x ₃	15,70	98,8	2,05	E
	$\bar{x}$	16,81	-	2,19	-
	s	1,3216	-	0,1692	-
	Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K (300 g/m ²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	14,77	98,9	1,92	C
	x ₂	11,98	98,9	1,56	C
	x ₃	11,48	99,0	1,49	E
	$\bar{x}$	12,74	-	1,66	-
	s	1,7729	-	0,2307	-
	Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (300 g/m ²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	7,80	99,0	1,01	E
	x ₂	(4,55)	99,1	(0,59)	E
	x ₃	8,22	98,9	1,07	E
	$\bar{x}$	8,01	-	1,04	-
	s	0,2970	-	0,0424	-
Tabelle A.25: Ergebnisse der Prüfung Haftzugfestigkeit an den Bohrkernproben der Teststrecke L 370					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
 B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
 C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
 E: innerhalb der Binderschicht
 F: teils oder ganz in der Klebefläche

ANHANG VI

Ergebnisse der Prüfungen zur Beurteilung des Schichtenverbundes
an bewitterten Varianten
Schichtenverbund nach Leutner, Haftzugprüfung

Schichtensystem		Verbundsystem			
		AW10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel		AW11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S (bewittert)	x ₁	43,85	1,92	52,06	-
	x ₂	44,45	1,67	35,27	1,50
	x ₃	45,01	1,58	58,28	2,33
	$\bar{x}$	44,44	1,72	48,54	1,92
	s	0,5801	0,1762	11,9028	0,5869
		Verbundsystem			
		AW12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm²)		AW13 – Heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/cm²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	54,82	2,50	62,36	2,83
	x ₂	57,34	2,33	50,87	2,83
	x ₃	56,96	2,42	63,53	2,50
	$\bar{x}$	56,37	2,42	58,92	2,72
	s	1,3586	0,0850	6,9960	0,1905
Tabelle A.26: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner AB 0/11 S auf ABi 0/16 S (bewittert)					

Schichtensystem		Verbundsystem			
		SW10 – Heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel		SW11 – Heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/cm ²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
Splittmastixasphalt 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S (bewittert)	x ₁	47,08	2,00	52,94	2,33
	x ₂	46,88	2,17	49,64	2,00
	x ₃	54,20	2,42	52,58	2,17
	$\bar{x}$	49,39	2,20	51,72	2,17
	s	4,1697	0,2113	1,8103	0,1650
		Verbundsystem			
		SW12 – Heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/cm ²)		SW13 – Heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/cm ²)	
		Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]	Scherkraft [kN]	Scherweg [mm]
	x ₁	52,91	2,25	50,89	2,25
	x ₂	45,78	2,00	53,19	2,83
	x ₃	56,22	1,92	59,51	2,33
	$\bar{x}$	51,64	2,06	54,53	2,47
	s	5,3352	0,1721	4,4635	0,3143
Tabelle A.27: Ergebnisse der Prüfung Schichtenverbund nach Leutner SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S (bewittert)					

Schichtensystem		AW10 – Verbundsystem heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
AB 0/11 S / SMA 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S (bewittert)	x ₁	10,32	99,1	1,34	C
	x ₂	14,63	99,1	1,90	C
	x ₃	14,20	99,1	1,84	C
	$\bar{x}$	13,05	-	1,69	-
	s	2,3740	-	0,3075	-
	SW10 – Verbundsystem heiß-auf-kalt ohne Vorspritzmittel				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	14,15	99,1	1,83	C
	x ₂	14,49	99,1	1,88	C
	x ₃	17,53	99,1	2,27	C
	$\bar{x}$	15,39	-	1,99	-
	s	1,8611	-	0,2409	-
Tabelle A.28: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit Nullvarianten ohne Vorspritzmittel AB 0/11 S / SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S (bewittert)					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
E: innerhalb der Binderschicht
F: teils oder ganz in der Klebefläche

Schichtensystem		AW11 – Verbundsystem heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/m²)			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
Asphaltbeton 0/11 S - Asphaltbinder 0/16 S (bewittert)	x ₁	16,79	99,1	2,18	C
	x ₂	19,39	99,1	2,51	C
	x ₃	17,04	99,1	2,21	C
	$\bar{x}$	17,74	-	2,30	-
	s	1,4344	-	0,1825	-
	AW12 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	19,49	99,0	2,53	C
	x ₂	18,38	99,0	2,39	C
	x ₃	20,04	99,0	2,60	C
	$\bar{x}$	19,30	-	2,51	-
	s	0,8456	-	0,1069	-
	AW13 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	18,61	99,0	2,42	C
	x ₂	23,82	99,0	3,03	C
	x ₃	19,63	99,0	2,55	C
	$\bar{x}$	20,69	-	2,67	-
	s	2,7611	-	0,3213	-
Tabelle A.29: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit AB 0/11 S auf ABi 0/16 S (bewittert)					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
E: innerhalb der Binderschicht
F: teils oder ganz in der Klebefläche

Schichtensystem		SW11 – Verbundsystem heiß-auf-kalt Haftkleber (150 g/m²)			
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
Splittmastixasphalt 0/8 S - Asphaltbinder 0/16 S (bewittert)	x ₁	16,03	99,1	2,08	C
	x ₂	16,09	99,1	2,09	C
	x ₃	14,60	99,1	1,89	C
	$\bar{x}$	15,57	-	2,02	-
	s	0,8435	-	0,1127	-
	SW12 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	17,04	99,0	2,21	C
	x ₂	16,12	99,0	2,09	C
	x ₃	13,90	99,0	1,81	C
	$\bar{x}$	15,67	-	2,04	-
	s	1,6142	-	0,2053	-
	SW13 – Verbundsystem heiß-auf-kalt U 60 K - C2 (150 g/m²)				
		Maximale Zugkraft [kN]	Ø Prüffläche [mm]	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm²]	Bruch- klassifizierung
	x ₁	16,98	99,1	2,20	C
	x ₂	15,17	99,1	1,97	C
	x ₃	15,79	99,1	2,05	C
	$\bar{x}$	15,98	-	2,07	-
	s	0,9198	-	0,1168	-
Tabelle A.30: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S (bewittert)					

Bruchklassifizierung: A: innerhalb der Deckschicht
B: teils in der Schichtgrenze, teils in der Deckschicht
C: in der Schichtgrenze

D: teils in der Schichtgrenze, teils im Binder
E: innerhalb der Binderschicht
F: teils oder ganz in der Klebefläche


```

*****
Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal:  Schichtenverbund Leutner
                                                Scherkraft
                                                AB 0/11 S auf ABi 16 S
                                                - bewittert -
*****

```

```

Mittelwert der Gruppe AW10 := 44.4367
Standardabweichung          := 0.5801
-----
Mittelwert der Gruppe AW11 := 48.5367
Standardabweichung          := 11.9028
-----
Mittelwert der Gruppe AW12 := 56.3733
Standardabweichung          := 1.3586
-----
Mittelwert der Gruppe AW13 := 58.9200
Standardabweichung          := 6.9960
-----

```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert    = 52.0667   N = 12
Mittleres Mittel    = 52.0667
Q innerhalb         = 385.6037   ( FG2 = 8)
Q zwischen          = 408.5802   ( FG1 = 3)
Q gesamt            = 794.1838   ( FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen  = 6.7378
Stand.innerh.d.Gru  = 6.9427
Varianz.innerh.d.Gru = 48.2005
Gesamtstandardabw.  = 8.4970

```

Testquotient $F^* = 2.83 < 4.070000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

```

*****
LSD-Test:

```

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
AW13	3	58.9200	2.5467	13.0719
AW12	3	56.3733	7.8367	13.0719
AW11	3	48.5367	4.1000	13.0719
AW10	3	44.4367		

```

*****

```

```

*****
Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal:  Schichtenverbund Leutner
                                                Scherweg
                                                AB 0/11 S auf ABi 16 S
                                                - bewittert -
*****

```

```

Mittelwert der Gruppe AW10 := 1.7233
Standardabweichung          := 0.1762
-----
Mittelwert der Gruppe AW11 := 1.9167
Standardabweichung          := 0.4150
-----
Mittelwert der Gruppe AW12 := 2.4167
Standardabweichung          := 0.0850
-----
Mittelwert der Gruppe AW13 := 2.7200
Standardabweichung          := 0.1905
-----

```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert      = 2.1942   N = 12
Mittleres Mittel      = 2.1942
Q innerhalb           = 0.4936   ( FG2 = 8)
Q zwischen             = 1.8741   ( FG1 = 3)
Q gesamt              = 2.3677   ( FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen    = 0.4563
Stand.innerh.d.Gru    = 0.2484
Varianz.innerh.d.Gru  = 0.0617
Gesamtstandardabw.    = 0.4639

```

Testquotient $F^* = 10.12 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

```

*****
LSD-Test:

```

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
AW13	3	2.7200	0.3033	0.4677	
AW12	3	2.4167	0.5000	0.4677	Grenze homogener Gruppen
AW11	3	1.9167	0.1933	0.4677	
AW10	3	1.7233			

```

*****

```

```

*****
Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal:  Schichtenverbund Leutner
                                                Scherkraft
                                                SMA 0/8 S auf ABi 16 S
                                                - bewittert -
*****

```

```

Mittelwert der Gruppe SW10 := 49.3867
Standardabweichung          := 4.1697
-----
Mittelwert der Gruppe SW11 := 51.7200
Standardabweichung          := 1.8103
-----
Mittelwert der Gruppe SW12 := 51.6367
Standardabweichung          := 5.3352
-----
Mittelwert der Gruppe SW13 := 54.5300
Standardabweichung          := 4.4635
-----

```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert      = 51.8183   N = 12
Mittleres Mittel      = 51.8183
Q innerhalb           = 138.1011   ( FG2 = 8)
Q zwischen             = 39.9264   ( FG1 = 3)
Q gesamt              = 178.0275   ( FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen    = 2.1062
Stand.innerh.d.Gru    = 4.1548
Varianz.innerh.d.Gru  = 17.2626
Gesamtstandardabw.    = 4.0230

```

Testquotient $F^* = 0.77 < 4.070000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

```

*****
LSD-Test:

```

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
SW13	3	54.5300	2.8100	7.8229
SW11	3	51.7200	0.0833	7.8229
SW12	3	51.6367	2.2500	7.8229
SW10	3	49.3867		

```

*****

```

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Schichtenverbund Leutner
Scherweg
SMA 0/8 S auf ABi 16 S
- bewittert -**

Mittelwert der Gruppe SW10 := 2.1967
Standardabweichung := 0.2113

Mittelwert der Gruppe SW11 := 2.1667
Standardabweichung := 0.1650

Mittelwert der Gruppe SW12 := 2.0567
Standardabweichung := 0.1721

Mittelwert der Gruppe SW13 := 2.4700
Standardabweichung := 0.3143

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert	=	2.2225	N = 12
Mittleres Mittel	=	2.2225	
Q innerhalb	=	0.4006	(FG2 = 8)
Q zwischen	=	0.2776	(FG1 = 3)
Q gesamt	=	0.6782	(FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen	=	0.1756	
Stand.innerh.d.Gru	=	0.2238	
Varianz.innerh.d.Gru	=	0.0501	
Gesamtstandardabw.	=	0.2483	

Testquotient $F^* = 1.85 < 4.070000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
SW13	3	2.4700	0.2733	0.4213
SW10	3	2.1967	0.0300	0.4213
SW11	3	2.1667	0.1100	0.4213
SW12	3	2.0567		

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Haftzugfestigkeit**
AB 0/11 S auf ABi 0/16 S
- bewittert -

Mittelwert der Gruppe AW10 := 1.6933
Standardabweichung := 0.3075

Mittelwert der Gruppe AW11 := 2.3000
Standardabweichung := 0.1825

Mittelwert der Gruppe AW12 := 2.5067
Standardabweichung := 0.1069

Mittelwert der Gruppe AW13 := 2.6667
Standardabweichung := 0.3213

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 2.2917 N = 12
Mittleres Mittel = 2.2917
Q innerhalb = 0.4850 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1.6348 (FG1 = 3)
Q gesamt = 2.1198 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 0.4262
Stand.innerh.d.Gru = 0.2462
Varianz.innerh.d.Gru = 0.0606
Gesamtstandardabw. = 0.4390

Testquotient $F^* = 8.99 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
AW13	3	2.6667	0.1600	0.4636	
AW12	3	2.5067	0.2067	0.4636	
AW11	3	2.3000	0.6067	0.4636	Grenze homogener Gruppen
AW10	3	1.6933			

Multipler Mittelwertvergleich für das Merkmal: **Haftzugfestigkeit**
SMA 0/8 S auf ABi 0/16 S
- bewittert -

Mittelwert der Gruppe SW10 := 1.9933
Standardabweichung := 0.2409

Mittelwert der Gruppe SW11 := 2.0200
Standardabweichung := 0.1127

Mittelwert der Gruppe SW12 := 2.0367
Standardabweichung := 0.2053

Mittelwert der Gruppe SW13 := 2.0733
Standardabweichung := 0.1168

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 2.0308 N = 12
Mittleres Mittel = 2.0308
Q innerhalb = 0.2530 (FG2 = 8)
Q zwischen = 0.0101 (FG1 = 3)
Q gesamt = 0.2631 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 0.0335
Stand.innerh.d.Gru = 0.1778
Varianz.innerh.d.Gru = 0.0316
Gesamtstandardabw. = 0.1547

Testquotient $F^* = 0.11 < 4.070000$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied der Mittelwerte ist nicht signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
SW13	3	2.0733	0.0367	0.3348
SW12	3	2.0367	0.0167	0.3348
SW11	3	2.0200	0.0267	0.3348
SW10	3	1.9933		
