

Technische Universität Dresden

Professur für Straßenbau

Name der Forschungsstelle

13589 BR / 1

AiF-Vorhaben-Nr.

01.07.2005 bis 30.06.2007

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema:

Untersuchungen zur Wirksamkeit des Haftverbundes und dessen Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen

Dresden, 24.10.2007

Ort, Datum



Unterschrift des Projektleiters

Inhaltsverzeichnis

0. Kurzfassung	1
1. Einleitung	2
2. Wissenschaftliche Problemstellung und Forschungsziel	2
2.1. Problemstellung	2
2.2. Forschungsziel und Vorgehensweise	3
3. Begriffsdefinitionen und Abkürzungen	5
3.1. Begriffsdefinitionen	5
4. Beschreibung des mechanischen Modells	7
4.1. Grundlagen des Schichtenverbunds von Asphaltbefestigungen	7
4.2. Prüfmethode für Schichtenverbund	10
4.2.1. Prüfung auf Abscheren ohne Normalspannung	11
4.2.2. Prüfung auf Abscheren mit Normalspannung	14
4.2.3. Direkte Haftzugversuche	16
4.2.4. Indirekte Haftzugversuche	16
4.2.5. Zerstörungsfreie Prüfverfahren	17
5. Berechnungen zur Festlegung der Versuchsparameter	20
5.1. Berechnung der Beanspruchung mit der Mehrschichtentheorie	22
5.2. Ausgewählte Straßenbefestigungen	25
5.3. Ergebnisse der Berechnungen	27
5.3.1. Vertikalspannungen an den Schichtgrenzen	28
5.3.2. Scherspannungen an den Schichtgrenzen	29
5.3.3. Relativverschiebungen an den Schichtengrenzen	31
5.3.4. Radialspannungen an den Schichtengrenzen	34
5.3.5. Vergleich der Vertikal- und Scherspannung	36
5.3.6. Vergleich der berechneten Relativverschiebungen	37
5.3.7. Schlussfolgerungen	39
6. Technische Beschreibung der verwendeten Prüfvorrichtungen	41
6.1. Dynamische Prüfvorrichtung	42
6.2. Statische Prüfvorrichtung	47

7.	Probekörperherstellung	48
7.1.	Untersuchte Verbundkombinationen	48
7.2.	Herstellung der Platten	49
7.3.	Probekörperherstellung	51
7.4.	Vorbereitung der Probekörper für die dynamische Versuche	52
8.	Prüfprogramme und Auswertung der Versuchsergebnisse	52
8.1.	Prüfprogramm für die dynamischen Versuche	52
8.2.	Auswertung der dynamischen Versuche	54
8.3.	Prüfprogramm für die statische Prüfvorrichtung	59
8.4.	Auswertung der statischen Versuche	60
9.	Versuchsergebnisse	61
9.1.	Ergebnisse der dynamischen Versuche	61
9.1.1.	Abhängigkeit der Messgrößen von der Lastwechselzahl	61
9.1.2.	Abhängigkeit der gemessenen Scherspannung vom Scherweg ...	64
9.2.	Abhängigkeit des Verbundfaktors von den Einflussgrößen	69
9.2.1.	Vergleich der geprüften Verbundkombinationen	73
9.3.	Ergebnisse der statischen Versuche	79
9.4.	Vergleich der Versuchsergebnisse mit der statischen und dynamischen Prüfvorrichtung	87
10.	Auswirkungen des Schichtenverbundes auf die Dauerhaftigkeit von Straßenbefestigungen	88
10.1.	Statischer Scherversuch	89
10.2.	Dynamischer Scherversuch	90
10.2.1.	Auswirkungen des Schichtenverbundes auf den Spannungszustand in der Befestigung	91
10.2.2.	Auswirkungen des Schichtenverbundes auf die Dauerhaftigkeit der Befestigungen	94
11.	Zusammenfassung	96
12.	Ausblick	97
13.	Literaturverzeichnis	99

0. Kurzfassung

Bedingt durch die Einbautechnologie und die eingesetzten Baustoffe werden Asphaltbefestigungen in der Regel schicht- und lagenweise eingebaut. An den Schichtengrenzflächen werden die Scherspannungen in Abhängigkeit von Temperatur und Normalspannung durch Reibung und Verzahnung zwischen den Gesteinskörnern, sowie Verklebung durch die Bindemittelfilme übertragen.

Die Prüfung des beim Einbau oder im Labor erreichten Schichtenverbundes erfolgt in Deutschland derzeit durch die Ermittlung der Bruchkraft mit der in ALP A-StB Teil 4 geregelten statischen Versuch nach LEUTNER. Zur Ermittlung von Verbundparametern zur Beschreibung des Schichtenverbundes im Rahmen von Dimensionierungsaufgaben haben sich diese statischen Versuche als nicht geeignet herausgestellt.

Im Rahmen des, durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF geförderten, Forschungsprojekts wurden eine Prüfvorrichtung und Prüfmethode für dynamische weggeregelte Versuche in servohydraulischen Prüfmaschinen mit Temperierung entwickelt. Damit können die für den Schichtenverbund maßgeblichen Einflussgrößen Temperatur, Normalspannung, Scherweg und Frequenz berücksichtigt werden. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche zeigen, dass die Normalspannung bei allen Prüftemperaturen die wesentlichste Einflussgröße auf den Verbund der Asphaltsschichten darstellt. Die Prüfparameter Scherweg und Prüffrequenz gewinnen mit zunehmender Temperatur bzw. abnehmender Normalspannung an Bedeutung. Der Vergleich der untersuchten Verbundkombinationen zeigte keine eindeutigen Tendenzen der Auswirkungen von Haftvermittlerart und Menge auf die Wirksamkeit des Schichtenverbundes.

Für den wirtschaftlichen Einsatz der Baustoffe im Asphaltstraßenbau kann die rechnerische Dimensionierung und Prognose der Lebensdauer von Asphaltbefestigungen unter Einbeziehung der beanspruchungsgerechten Prüfung des Schichtenverbundes mit dem im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Verfahren durchgeführt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

1. Einleitung

Asphaltbefestigungen werden in der Regel schichtweise aufgebaut. Für die Dauerhaftigkeit einer Befestigung ist ein guter Schichtenverbund notwendig, damit die Schichten einer Asphaltbefestigung bei der Lastabtragung als Einheit wirken. Der Verbund der Schichten wirkt über die Reibung zwischen den Gesteinskörnern, die Verzahnung der Gesteinskörner in der Schichtengrenzfläche und Verklebung mit Bitumen. Diese drei Einflussgrößen sollten zu einer möglichst vollständigen Übertragung der Scherspannungen zwischen den Schichten führen.

Für die Gewährleistung eines guten Schichtenverbundes wird in der Regel die Oberfläche der fertigen Asphaltenschicht vor dem Einbau der nächsten Schicht gesäubert und mit einer Bitumenemulsion angespritzt. Die Emulsionsmenge und die Art der Emulsion können variiert werden. In der Praxis werden in der Regel unmodifizierte Bitumenemulsionen U 60 K und polymermodifizierte Emulsionen PmOB U 60 K mit Anspritzmengen von 150 bis 450 g/m² verwendet.

Dabei kann zu wenig Emulsion zu Verbundstörungen durch mangelnde Verklebung führen. Die Aufbringung von zu viel oder zu weich eingestellter Emulsion kann dazu führen, dass das aufgespritzte Bitumen als „Schmierfilm“ zwischen den Schichten wirkt, wodurch die Übertragung der Scherkräfte ebenfalls reduziert wird.

Die genaue Kenntnis über die Wirkung des Schichtenverbundes ist eine wesentliche Voraussetzung für die Einschätzung der Auswirkungen des Schichtenverbundes auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen.

2. Wissenschaftliche Problemstellung und Forschungsziel

2.1. Problemstellung

Bei der Bemessung von Asphaltstraßenbefestigungen wird derzeit davon ausgegangen, dass die eingebauten Schichten als Einheit wirken und ein vollständiger Verbund der Schichten erreicht wird. Der Verbund der Schichten soll erstens die vollständige Übertragung der Scherspannungen zwischen der Unterseite der oberen

Schicht und der Oberseite der unteren Schicht ermöglichen und zweitens in vertikaler Richtung ein Abreißen der oberen Schicht von der unteren verhindern.

Der Verbund der Schichten bei Asphaltbefestigungen unterliegt infolge der Belastungen durch den Straßenverkehr dynamischen Beanspruchungen, die viel kleiner sind als die Bruchspannung. Bislang wird mit dem statischen Versuch zum Schichtenverbund nach ALP A-StB Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER [1] die Bruchspannung bei einer definierten Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min an einem auf 20°C temperierten Bohrkern bestimmt. Bei diesem Verfahren wird das in einer Asphaltbefestigung auftretende Temperaturspektrum von etwa -10°C bis +50°C sowie die dynamische Belastung der Schichtengrenze vernachlässigt.

2.2. Forschungsziel und Vorgehensweise

Der Schichtenverbund in Asphaltkonstruktionen soll im vorliegenden Forschungsprojekt mit einem dynamischen Scherversuch in Anlehnung an den statischen Scherversuch nach LEUTNER [1] untersucht werden. Für den dynamischen Scherversuch wurde eine Schervorrichtung entwickelt, die eine wiederholte dynamische Aufbringung des Scherweges in der Schichtengrenzfläche bei gleichzeitig wirkender statischer Normalspannung auf diese Grenzfläche ermöglicht. Als Probekörper sind Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm vorgesehen. Diese können einer Straßenbefestigung entnommen oder aus Platten gebohrt werden, die mit dem Walzsektorverdichter im Labor hergestellt werden. Bedingt durch das temperaturabhängige Spannungs-Verformungsverhalten des Asphaltes und des Haftvermittlers müssen die Probekörper in der Prüfvorrichtung bei verschiedenen, in Straßenbefestigungen auftretenden, Temperaturen geprüft werden.

Die Belastung der Probekörper durch Scherweg und Normalspannung soll beanspruchungsgerecht erfolgen, d. h. entsprechend den Beanspruchungsgrößen, die in Straßenbefestigungen an den Schichtgrenzen auftreten. Die Scherwege und Normalspannungen sollen im Vorfeld der Versuche temperaturabhängig für ausgewählte Straßenbefestigungen auf der Grundlage der Mehrschichtentheorie berechnet werden. Das Prüfprogramm für die dynamischen Laborversuche zum Schichtenverbund wird anschließend anhand dieser ermittelten Beanspruchungsgrößen aufgestellt und

durchgeführt. Im Anschluss an die Versuche werden die ermittelten Materialeigenschaften ausgewertet und als Verbundmodell formuliert, welches letztlich in ein Finite-Elemente-(FE)-Programm eingearbeitet wird. Mit Hilfe dieses Berechnungsprogramms für den Spannungs- und Verformungszustand von Straßenbefestigungen kann dann der Einfluss des Schichtenverbundes auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen (Spurrinnen- und Rissgefahr) abgeschätzt werden.

3. Begriffsdefinitionen und Abkürzungen

3.1. Begriffsdefinitionen

Schichtenverbund:

komplexes Zusammenspiel der vollflächigen Verbindung zweier Schichten mittels Scherspannungsübertragung infolge Reibung, und/oder Verzahnung und/oder Verklebung zweier Asphaltsschichten

Schichtengrenzfläche:

Grenzfläche zwischen der Oberfläche der unteren Schicht und dem darauf aufgebrachtten Haftvermittler sowie der oberen Schicht

Scherbeanspruchung:

Beanspruchung der Schichtengrenzfläche zweier Schichten parallel zur Scherfläche

Scherwiderstand:

mechanisch wirksamer Widerstand an der Grenzfläche zwischen zwei Asphaltsschichten gegen die einwirkende dynamische Scherspannung parallel zur Scherfläche

Scherfestigkeit:

bei statischen Scherversuchen ermittelte Bruchspannung an der Grenzfläche zwischen zwei Asphaltsschichten

Scherspannung:

infolge Relativverschiebung zwischen zwei Schichten wirksame Spannung parallel zur Schichtengrenzfläche

Haftzugwiderstand:

mechanisch wirksamer Widerstand an der Schichtengrenzfläche zwischen zwei Schichten gegen die dynamisch einwirkende Normalzugspannung senkrecht zur Schichtengrenzfläche

Haftzugfestigkeit:

bei statischen Haftzugversuchen ermittelte Bruchspannung der Verbindung zweier Schichten bei Zugbeanspruchung senkrecht zur Grenzfläche zweier Schichten

Normalspannung:

senkrecht zur Schichtengrenzfläche wirkende Spannung

Torsionsbeanspruchung:

infolge aufgezwungener Verdrehung der Probekörperstirnflächen entstehende Beanspruchung der Schichtengrenzfläche sowie der zwei Probekörperbestandteile

Relativverschiebung:

horizontale Verschiebung der Unterseite der oberen Schicht gegenüber der Oberseite der unteren Schicht infolge aufgezwungener Verformung

Haftvermittler:

zur Verbesserung der Verklebung zweier Schichten gleichmäßig und vollflächig aufgebracht Bitumen (Emulsion oder Heißkleber)

Verbundfaktor:

bei der Mehrschichtentheorie verwendeter Berechnungsparameter, Quotient aus Relativverschiebung und Scherspannung zur Beschreibung der Wirksamkeit des Verbundes zweier Schichten

Schermodul:

bei der Finiten-Elemente-Methode verwendeter Berechnungsparameter zur Beschreibung der Wirksamkeit des Verbundes zweier Schichten

4. Beschreibung des mechanischen Modells

4.1. Grundlagen des Schichtenverbunds von Asphaltbefestigungen

Asphaltbefestigungen werden in der Regel mehrlagig und/oder mehrschichtig aufgebaut, so dass einbaubedingt wenige Millimeter dicke Übergangsbereiche von jeweils zwei Schichten bzw. Lagen über die gesamte Länge und Breite der Befestigung entstehen.

Diese Übergangsbereiche bestehen jeweils aus den Randbereichen der Schichten bzw. Lagen und der dazwischen liegenden, in der Regel deutlich sichtbaren, Schichtengrenzfläche (Abbildung 1). An Bohrkernen ist in den Randbereichen der Schichten häufig eine Ausrichtung der Bruchflächen von Gesteinskörnern in Richtung der Schichtengrenzfläche erkennbar. Mit zunehmender Gesteinskorngröße sind an der Schichtengrenzfläche auch größere luftgefüllte Hohlräume an der Mantelfläche der Bohrkern zu erkennen.



Abbildung 1: Ausrichtung der Gesteinskörner und Hohlräume an der Schichtengrenzfläche (ABi 0/16 S / ATS 0/22 CS)

Die Schichtengrenzfläche ist bei Binder-/Tragschichtmaterial mit Korngrößen von 16 bzw. 22 mm viel deutlicher sichtbar, als bei Deck-/Binderschichtmaterial (vgl. Vergleich der Abbildung 1 und Abbildung 2).

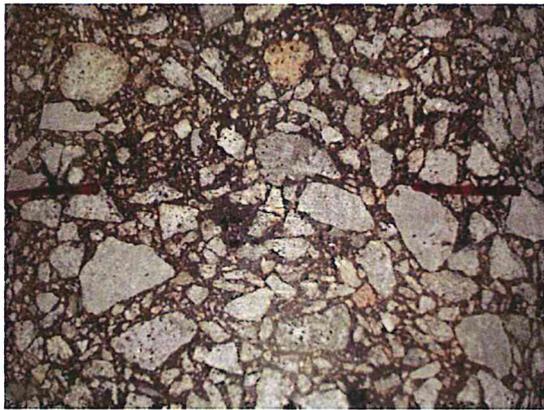


Abbildung 2: Schichtengrenze am Bohrkern (SMA 0/8 S / ABi 0/16 S)

Die Lastabtragung erfolgt durch die Lastverteilung der Schichten sowie über Reibung, Verzahnung und Verklebung zwischen den Schichten. Bei der Übertragung von Scherspannungen über die Schichtengrenzfläche wirken diese zuletzt genannten drei Faktoren gleichzeitig mit unterschiedlichen Anteilen in Abhängigkeit von den eingesetzten Asphalten sowie Art und Menge des Haftvermittlers.

Der Anteil der Reibung an der Scherspannungsübertragung wirkt durch direkte Korn-zu-Korn-Kontakte zwischen Gesteinskörnern, die sich an der Grenzfläche zwischen zwei Asphaltmischungen befinden. Die Reibung wird beeinträchtigt durch die Bindemittelfilme und ist damit abhängig von der Bindemittelmenge auf den Kornoberflächen der Schichten und von der Menge des aufgetragenen Haftvermittlers. Asphaltgemische mit einem hohen Bindemittelanteil sowie große Mengen an Haftvermittler verringern über die geringere Anzahl und die reduzierten Flächen der Korn-zu-Korn-Kontakte die Reibung zwischen den Gesteinskörnern an der Schichtengrenze.

Die Verzahnung der Schichten erfolgt während der Verdichtung durch das Eindringen von Gesteinskörnern der oberen Schicht in Vertiefungen der Oberfläche der unteren Schicht.

Die Verklebung der Schichten hängt von den Bindemittelfilmen der zwei Schichten, der Menge und Viskosität der Haftvermittler, den Gesteinskorngrößen und dem daraus resultierenden Anteil an Hohlräumen in der Schichtengrenzfläche ab.

Die Einzelanteile der Reibung, Verzahnung und Verklebung an der Scherspannungsübertragung über die Schichtengrenzfläche sind mit Laborversuchen kaum getrennt ermittelbar. Tendenziell wird bei tiefen Temperaturen die Verklebung einen weitaus höheren Einfluss haben als bei hohen Temperaturen. Die Einflüsse von Reibung und Verzahnung müssten bei hohen Temperaturen und insbesondere gleichzeitig wirkenden hohen Normalspannungen überwiegen.

Bei der Dimensionierung von Asphaltbefestigungen wird derzeit von einem vollständigen Verbund von zwei Asphaltsschichten wie bei einer monolithischen Schicht ausgegangen. Anhand der vorangestellten theoretischen Betrachtung des Schichtenverbundes müsste der Übergangsbereich bei zwei Schichten bzw. Lagen gegenüber einer monolithischen Schicht eine veränderte Spannungsverteilung bedingen. Dabei ist bei jeder Schichtengrenzfläche eine geringere Scherspannungsübertragung als bei einer monolithischen Schicht zu erwarten.

Die Umsetzung des Schichtenverbundes bei Dimensionierungsberechnungen zur Ermittlung des Spannungs- und Verformungszustandes von Asphaltbefestigungen kann anschaulich am besten mit Hilfe des Brettstapels nach Abbildung 3 beschrieben werden. Beim Schichtenverbund sind entsprechend dieser Darstellung prinzipiell drei Möglichkeiten vorhanden:

1. Die Schichten wirken als „Einheit“: d. h. sie wirken wie eine monolithische Schicht. An den Schichtengrenzen treten sehr große Scherspannungen, aber keine Relativverschiebungen auf.
2. Die Schichten sind miteinander verklebt: In Abhängigkeit von der Art und Menge des Klebers können Scherspannungen und Relativverschiebungen in unterschiedlichen Größenordnungen auftreten. Bei einer hohen Festigkeit des Klebers werden große Scherspannungen und kleine Relativverschiebungen auftreten. Im Gegensatz dazu sind bei einer geringen Festigkeit des Klebers die Scherspannungen gering und die Relativverschiebungen groß. Dazwischen sind alle Abstufungen möglich. Zusätzlich zur Verklebung wirkt die Reibung zwischen den Schichten, jedoch wird dieser Einfluss mit zunehmender Haftvermittlermenge geringer.
3. Die Schichten liegen lose übereinander: Bei der Aufbringung einer Verkehrslast tritt zwischen den Schichten nur Reibung und Verzahnung infolge der Last

und dem Eigengewicht der Schichten auf. Dabei entstehen sehr geringe Scherspannungen, aber vergleichsweise sehr große Relativverschiebungen.

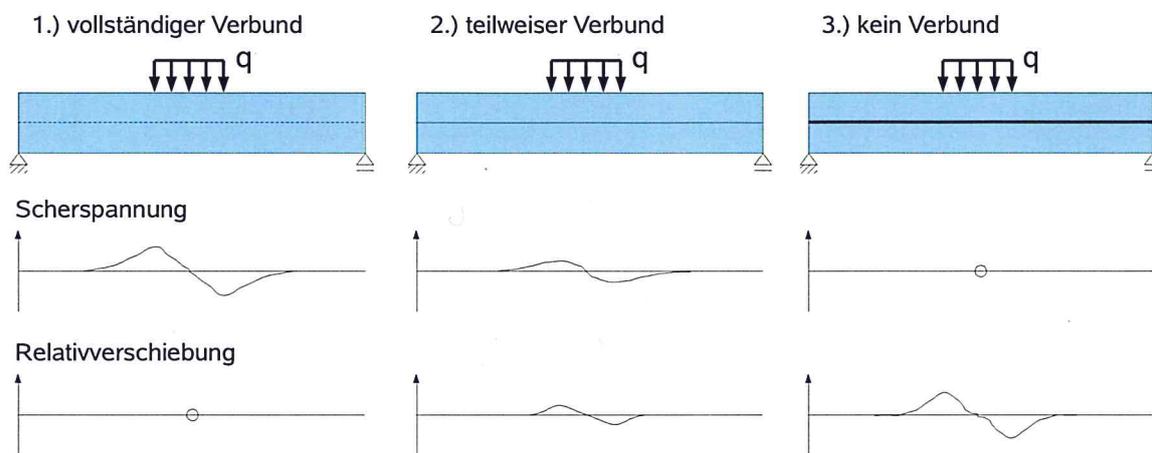


Abbildung 3: Brettchichtmodell, qualitativer Verlauf von Scherspannung und Relativverschiebung bei drei Verbundarten

Für die beanspruchungsgerechte realitätsnahe Modellierung des Schichtenverbundes liegen bislang keine ausreichenden Kenntnisse vor. Im folgenden Kapitel werden die in der Literatur beschriebenen Prüfverfahren sowie die erzielten Kenntnisse kurz dargestellt.

4.2. Prüfmethoden für Schichtenverbund

Die Prüfmethoden für den Schichtenverbund lassen sich am besten entsprechend den Prüfkomponenten nach Abbildung 4 einteilen.

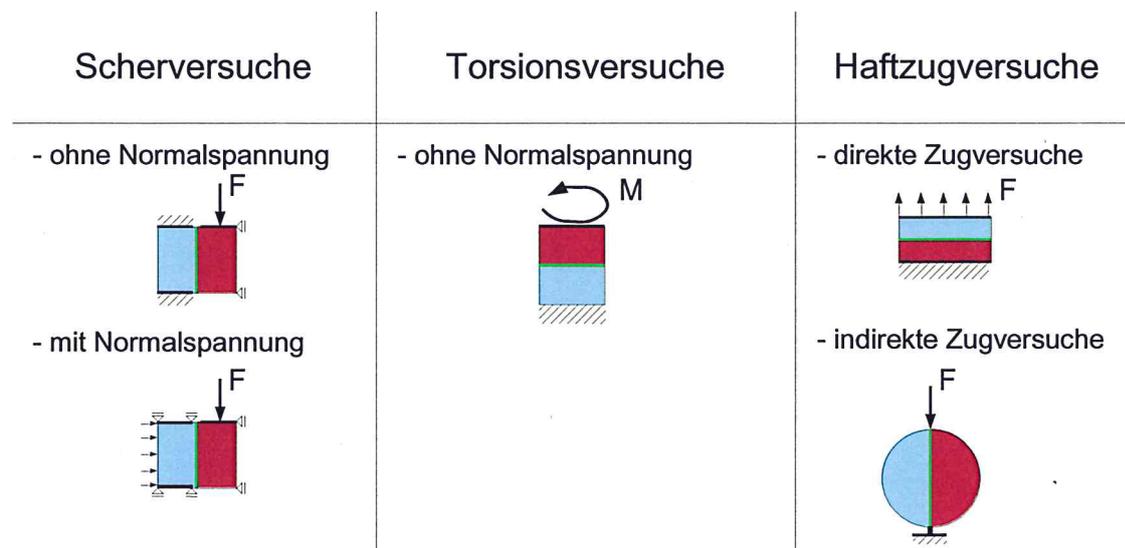


Abbildung 4: Übersicht zur Einteilung der Prüfmethode

Zusätzlich zu den Prüfkomponenten ist bei allen Prüfmethode die Unterscheidung in:

- Labor- und Feldversuche sowie
- statische und dynamische Versuche, letztere mit wiederholter Lasteintragung notwendig.

4.2.1. Prüfung auf Abscheren ohne Normalspannung

Die am weitesten verbreiteten Laborversuche zur qualitativen Untersuchung des Schichtenverbundes sind die statischen Abscherversuche ohne Normalspannung. Beim Scherversuch wird der Probekörper auf einer Seite der Schichtengrenzfläche fixiert und an der Grenzfläche über Scherbacken mit konstantem Vorschub bis zum Bruch abgeschert. Diese Versuche werden in einigen Staaten vom Prinzip her gleich, jedoch mit unterschiedlichen Prüfparametern durchgeführt.

Vorgeschriebene Prüfparameter:

- Prüftemperatur
- Vorschubgeschwindigkeit
- Probekörperabmessungen
- Abstand der Scherbacken



Abbildung 5: Scherversuch nach LEUTNER, Deutschland

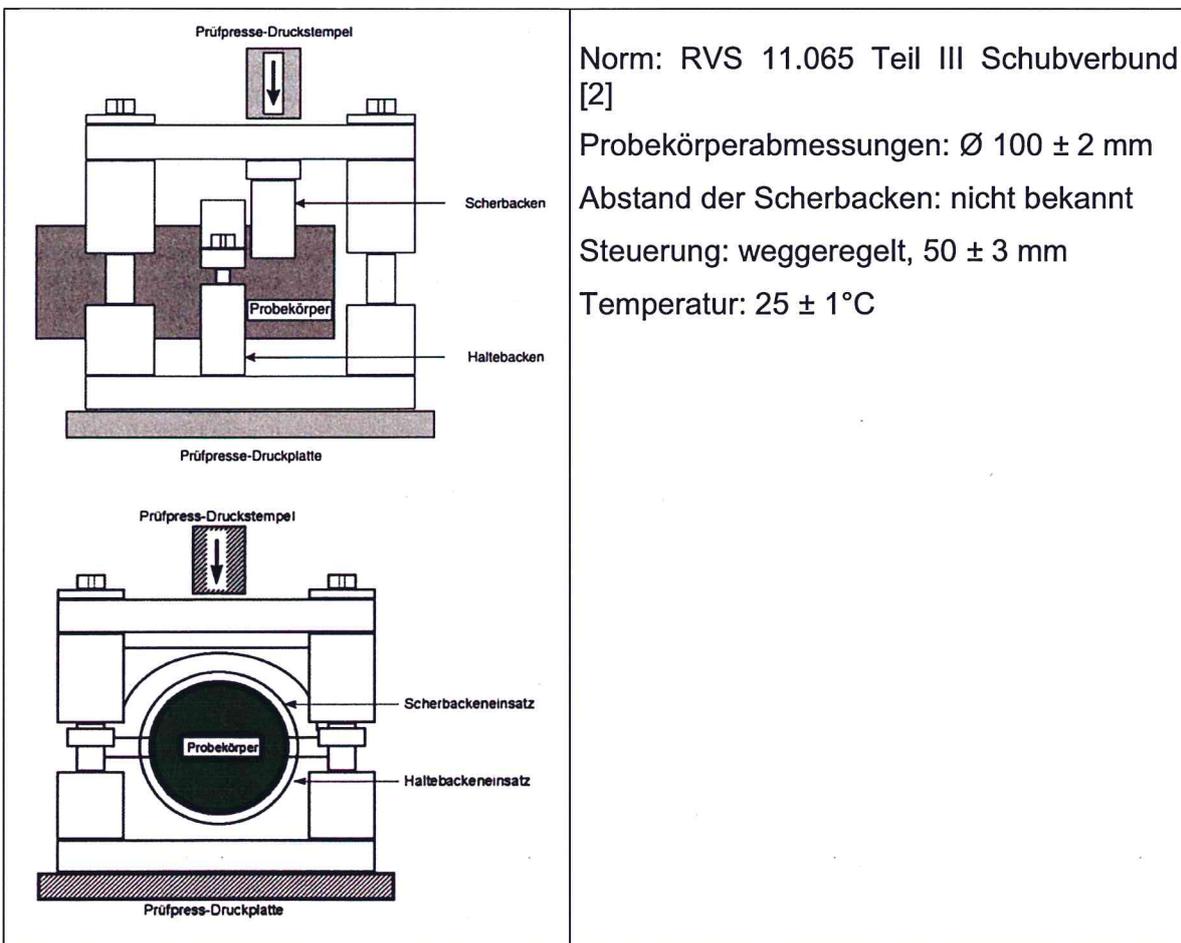


Abbildung 6: Schervorrichtung Österreich [3]

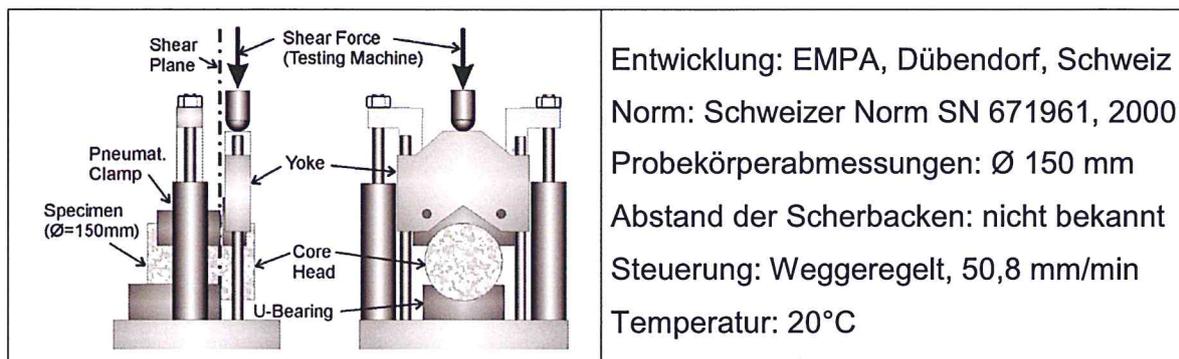


Abbildung 7: Schervorrichtung EMPA, Schweiz [4]

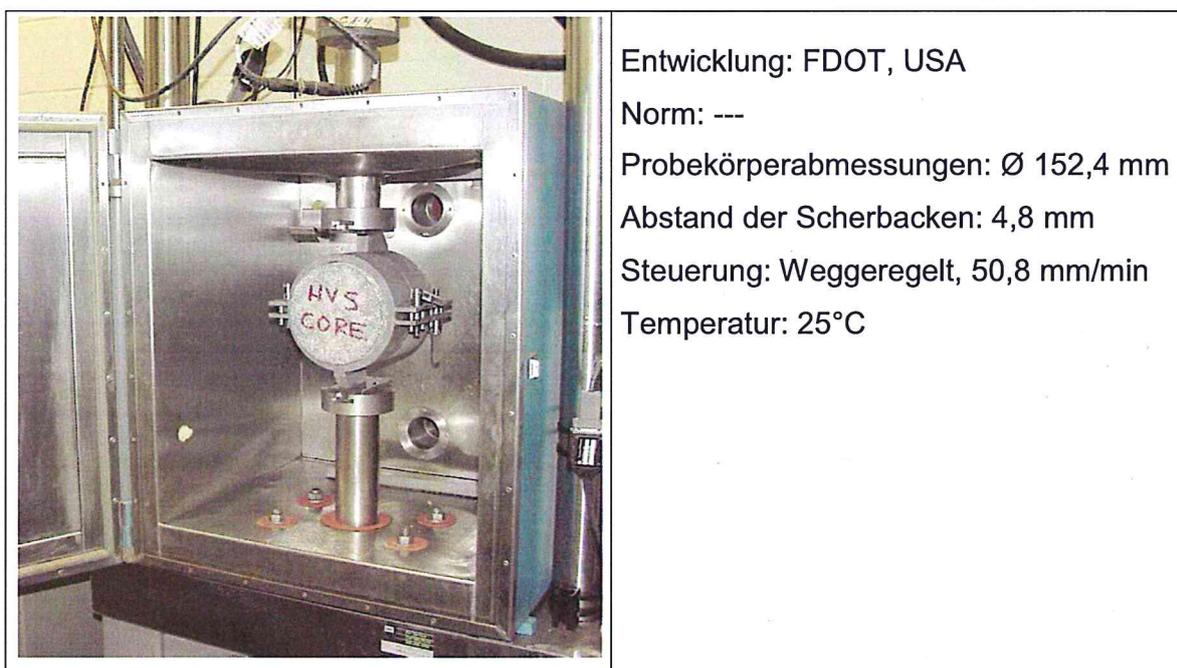


Abbildung 8: Schervorrichtung FDOT, USA [5]

Bei allen dargestellten Versuchen erfolgt die Bewertung des Schichtenverbundes hauptsächlich durch den Vergleich der gemessenen Bruchkraft bzw. Bruchspannung und seltener durch die Auswertung des Scherweges bei Probekörperbruch. Üblich ist die Darstellung der Versuchsergebnisse in Form von Scherkraft – Scherweg Diagrammen entsprechend Abbildung 9.

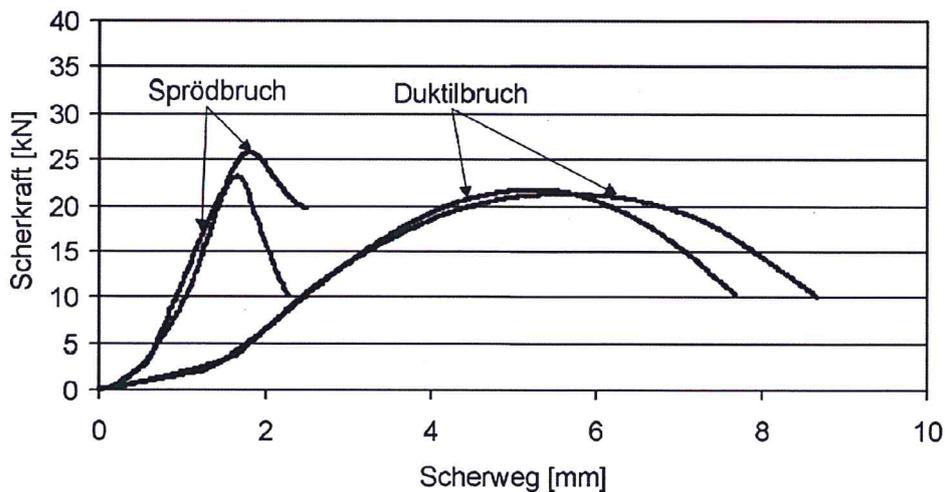


Abbildung 9: Beispiel Scherkraft-Scherweg-Diagramm [6]

4.2.2. Prüfung auf Abscheren mit Normalspannung

Über Laborversuche, welche das Abscheren bei gleichzeitig wirkender Normalkraft aus Verkehrslasten simulieren, sind nur wenige Literaturquellen verfügbar. An der Universität Nottigham wurde 1985 der in Abbildung 10 dargestellte dynamischer Versuch entwickelt [7], mit dem bei konstanter Normalkraft von 6 kN ($0,059 \text{ N/mm}^2$) jeweils 1.000 Lastwechsel bei einer Frequenz von 2 Hz kraftgeregelt Scherkräfte bis zu 40 kN ($0,39 \text{ N/mm}^2$) simuliert wurden. Über die Prüftemperatur wurden keine Angaben gemacht. Die Scherwege wurden mit Hilfe von LVDT's an der Probe gemessen.

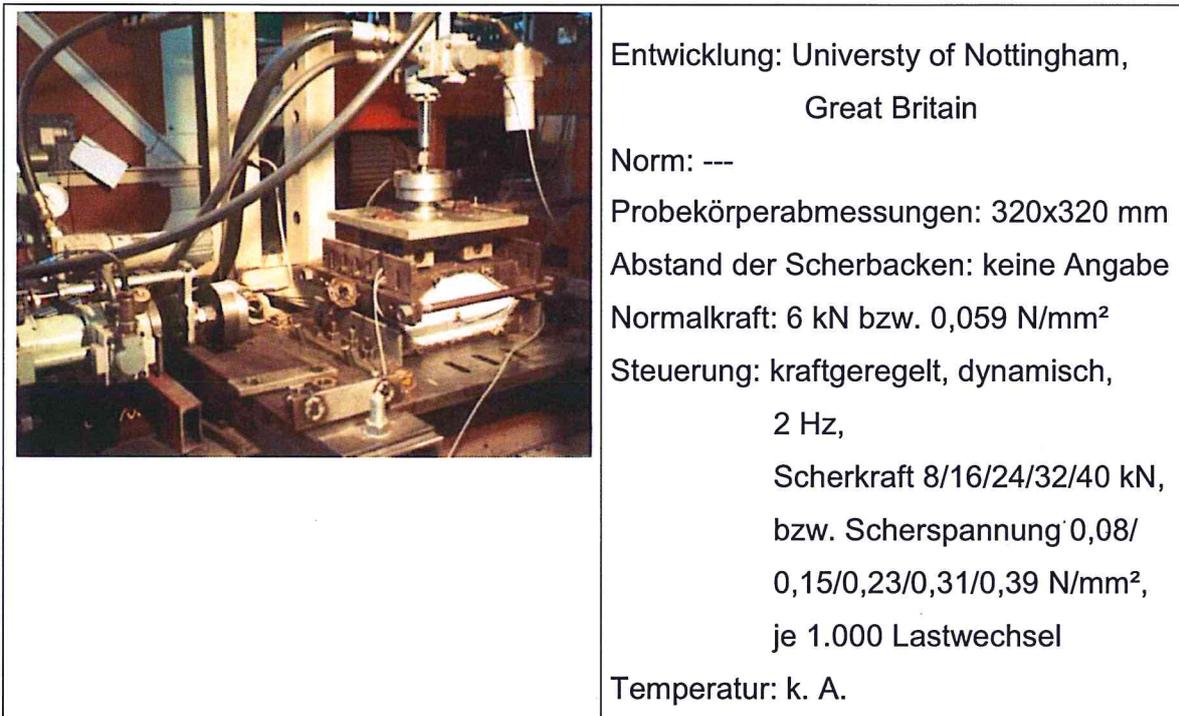


Abbildung 10: Shear Box, University of Nottingham [7]

An der Universität Ancona ist 1992 ein statischer Versuch für Probekörper mit Abmessungen von 100 x 100 mm bzw. Ø 100 mm entwickelt worden. Mit dem in Abbildung 11 dargestellten Versuch werden bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 2,5 mm/min, Temperaturen von 20 oder 40°C und Normalspannungen von 0 bis 0,4 N/mm² Bruchspannung und Scherweg ermittelt.

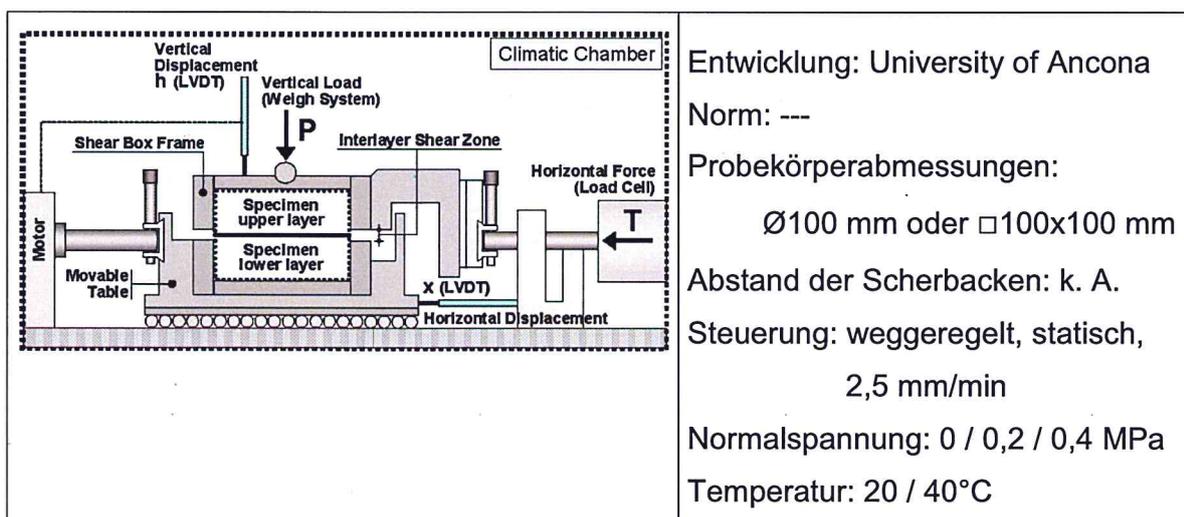


Abbildung 11: ASTRA [8]

4.2.3. Direkte Haftzugversuche

Die Haftzugfestigkeit von zwei Asphaltsschichten wird weltweit nach dem gleichen Prinzip, aber unter verschiedenen Prüfbedingungen im Labor und in situ durchgeführt. Es werden Probekörperdurchmesser von 50, 100 oder 150 mm² jeweils über 2-Komponenten-Kleber mit Stahl- oder Aluminiumscheiben kraftschlüssig verbunden und anschließend mit Prüfgeschwindigkeiten von 200 N/mm² [2] oder 300 N/mm² [9] in axialer Richtung bis zum Bruch belastet und die maximale Haftzugspannung z. B. bei 15°C bestimmt.

Bei diesem Verfahren ist zu beachten, dass die Bruchfläche nicht immer mit der Schichtengrenzfläche identisch ist und ganz oder teilweise durch eine der zwei Asphaltsschichten verlaufen kann. Weiterhin sind die Streuungen der Versuchsergebnisse im Vergleich zu den von Tschegg entwickelten indirekten Haftzugversuchen relativ groß.

4.2.4. Indirekte Haftzugversuche

Von Tschegg [3] wurde das Keilspaltverfahren, als ein mit einfachen mechanischen Prüfmaschinen durchführbares Prüfverfahren für die statische Haftzugfestigkeit entwickelt. Eine würfel- oder zylinderförmige Probe wird über einen mit Rollen beinahe reibungsfrei gelagerten Keil mit einem Winkel von 5 bis 15° in vorbereiteten Kerben in der Spaltebene geprüft. In Höhe der Keile (wurde mit elektronischen Wegaufnehmern die durch die Keilwirkung verursachte Kraftverschiebung gemessen.

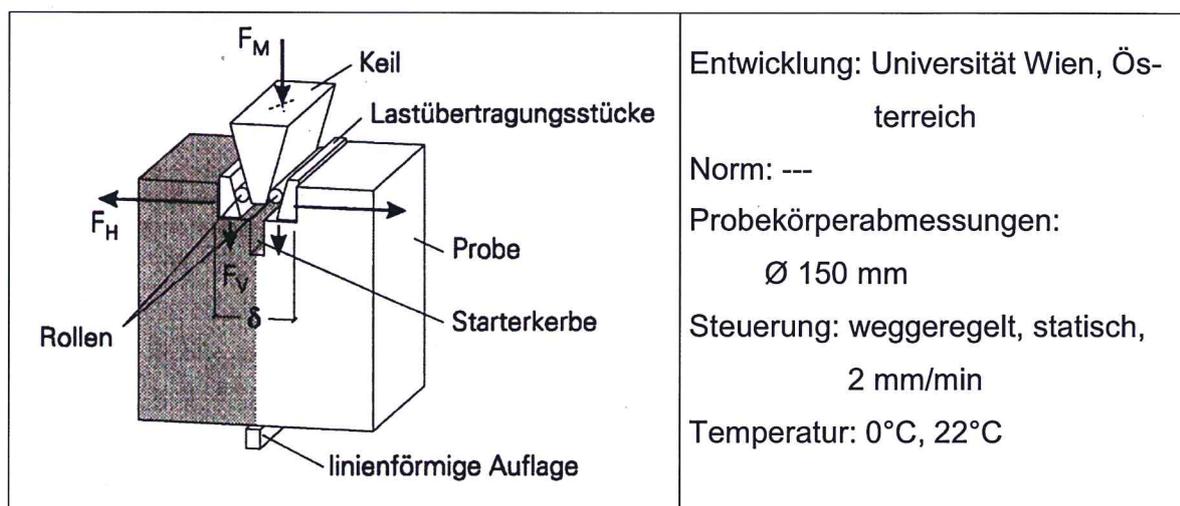
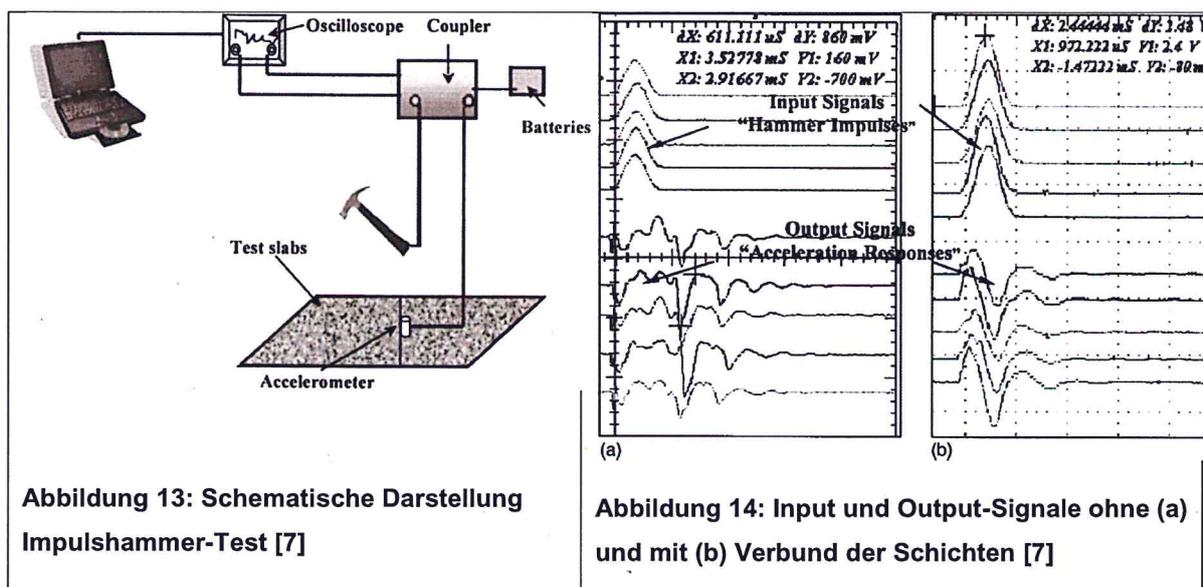


Abbildung 12: Keilspaltverfahren nach Tschegg [3]

4.2.5. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Impulshammer-Test

Beim von Kruntcheva [7] entwickelten Impulshammer-Test werden auf dem Prüfkörper im Abstand von jeweils 15 cm vom Testpunkt piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer befestigt, mit deren Hilfe die beim Hammerimpuls aufgebrachtene Schwingungen aufgezeichnet werden. Die Schwingungsverläufe von vorhandenem und nicht vorhandenem Schichtenverbund unterscheiden sich so deutlich, dass durch das zerstörungsfreie Prüfverfahren qualitative Aussagen zum Schichtenverbund möglich sind. Diese konnten mit dem Scherversuch nach LEUTNER bestätigt werden. Eine direkte Messung von Prüfparametern zur Bestimmung des Scherwiderstandes oder der Haftzugwiderstandes ist mit diesem Verfahren nicht möglich.



Falling Weight Deflectometer (FWD)

Ähnlich wie beim Impulse-Hammer-Test werden beim FWD die durch einen Impuls ausgelösten Schwingen auf der Oberfläche der Befestigung mit Hilfe von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern gemessen und aufgezeichnet. Anhand von Rückrechnungsverfahren [10] können unter der Voraussetzung von bekannten Materialeigenschaften der Befestigung die Verbundeigenschaften der Schichten bestimmt werden. Dafür werden in dem Rechenverfahren die Parameter zur Beschreibung des Schichtenverbundes solange variiert, bis berechneten Verformungen der Oberfläche mit den gemessenen Verformungen übereinstimmen. Eine direkte Messung von Prüfparametern an der Schichtengrenze zur Bestimmung des Scherwiderstandes oder der Haftzugwiderstandes ist mit diesem zerstörungsfreien Verfahren nicht möglich. Aufgrund einer Vielzahl von Eingangsgrößen in die Berechnungen (E-Moduli, Querdehnzahlen, schwer ermittelbare Temperaturverläufe im Schichtenpaket) ist der Erfolg dieser Methode als eher gering einzuschätzen.

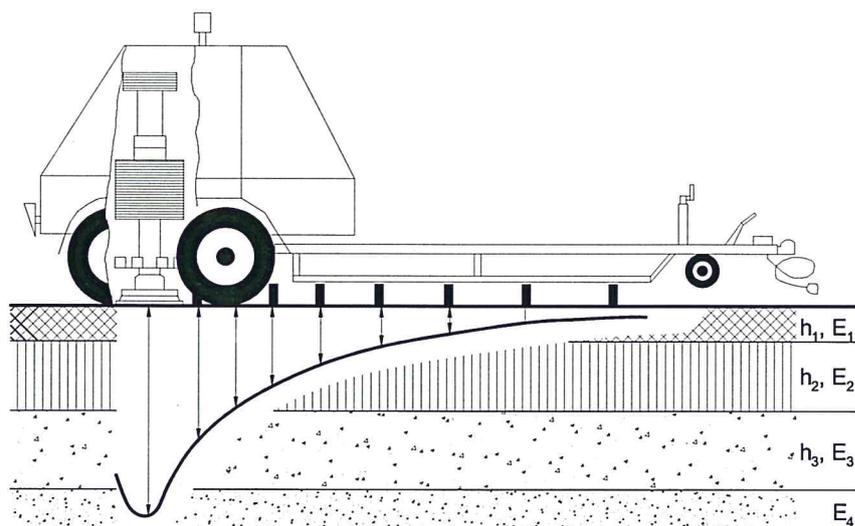


Abbildung 15: Falling Weight Deflectometer

5. Berechnungen zur Festlegung der Versuchsparameter

Die in Asphaltbefestigungen auftretenden Beanspruchungen in den Verbundbereichen der einzelnen Schichten und Lagen sollten immer viel kleiner als die maximal aufnehmbare Bruchspannung sein, damit die Dauerhaftigkeit der Straßenbefestigung gewährleistet ist. Für die Entwicklung eines für Dimensionierungsaufgaben geeigneten Versuchs zur Beschreibung des Schichtenverbundes ist damit ein statischer Versuch mit der Bestimmung der Bruchlast ungeeignet.

Für die Entwicklung eines beanspruchungsgerechteren dynamischen Versuchs wird im folgenden mit Hilfe von Berechnungen des Spannungs- und Verformungszustandes von ausgewählten Straßenbefestigungen das Ziel verfolgt, die Beanspruchung des Schichtenverbundes unter Verkehrslast zu ermitteln. Die Art und Größenordnung der berechneten Spannungen und Verformungen zwischen den Schichten der Straßenbefestigungen sollen als Grundlage für die Festlegung der Versuchsbedingungen für den dynamischen Scherversuch dienen.

Die wesentlichen Parameter für den dynamischen Scherversuch sind die in Abbildung 16 dargestellte:

- Scherspannung,
- Normalspannung und
- Relativverschiebung.

Diese drei Parameter müssen in Abhängigkeit von der Temperaturverteilung in der Straßenbefestigung ermittelt werden.

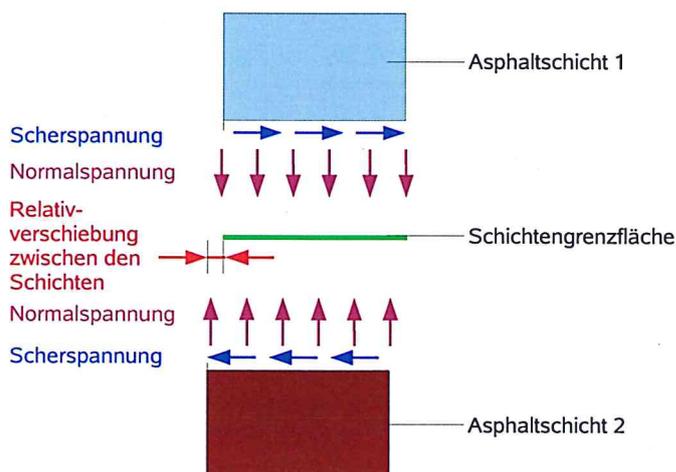


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Verbundparameter am verformten System

Die Annahmen über die Wirkung des Schichtenverbundes auf die elastischen Relativverschiebungen zwischen den Schichten müssen derzeit aufgrund ungenügender Kenntnisse über die Größenordnung den gesamten Bereich zwischen vollständigem Verbund und ohne wirksamen Verbund umfassen. Damit werden bei den Berechnungen nur Bereiche ermittelt, in denen die oben aufgeführten drei Parameter in Abhängigkeit von der Temperatur liegen.

Die maßgebenden Eingangsgrößen für die Berechnung der Beanspruchung in den Schichtengrenzflächen bei Asphaltbefestigungen sind:

- die Schichtdicken sowie die temperaturabhängigen Steifigkeiten der Asphalt-schichten,
- die Steifigkeit der ungebundenen Schichten und des Untergrundes,
- Lastgröße (Achslast) und Fläche der Lasteintragung bzw. Kontaktdruckverteilung (zwischen Reifen und Oberfläche der Befestigung) und
- der Schichtenverbund.

Für die Berechnung des Spannungs- und Verformungszustandes von Straßenbefestigungen unter Verkehrslast werden in der Regel zwei Verfahren verwendet:

- a. Mehrschichtentheorie
- b. Finite-Elemente-Methode

Beide Modelle beinhalten eine Reihe von Annahmen, mit dem das System Fahrzeug-

Fahrbahn als vereinfachendes Modell mit den drei wesentlichen Bestandteilen untergliedert wird:

- a. Fahrzeug als Verkehrslast,
- b. Fahrbahnoberfläche mit der Lasteinleitung,
- c. Straßenbefestigung und Unterbau/Untergrund.

Die Festlegung der Versuchsbedingungen erfolgte mit Berechnungen auf der Grundlage der Mehrschichtentheorie. Aufbauend auf die dynamischen Versuche soll das Materialverhalten so beschrieben werden, dass es später als Verbundmodell in ein FE-Programm integriert werden kann, mit dessen Hilfe die Abschätzung der Einflusses des Schichtenverbundes auf die Dauerhaftigkeit von Straßenbefestigungen möglich wird.

5.1. Berechnung der Beanspruchung mit der Mehrschichtentheorie

Die Mehrschichtentheorie ist gegenwärtig die überwiegend angewandte Methode zur Berechnung des Beanspruchungszustandes in Straßenbefestigungen. Die Theorie setzt Radialsymmetrie, linear-elastisches und isotropes Materialverhalten von homogenen masselosen Schichten sowie die in jede horizontale Richtung unendliche Ausdehnung der Schichten auf einem elastischen Halbraum voraus.

Eine in Deutschland häufig angewandte Möglichkeit der rechentechnischen Umsetzung der Mehrschichtentheorie stellt das 1979 von der SHELL entwickelte Computerprogramm BISAR (Bitumen Structures Analysis in Roads) [11] dar. Das System Fahrzeug-Fahrbahn wird bei der Mehrschichtentheorie vereinfachend als Verkehrslast und geschichtete Befestigung nach Abbildung 17 modelliert.

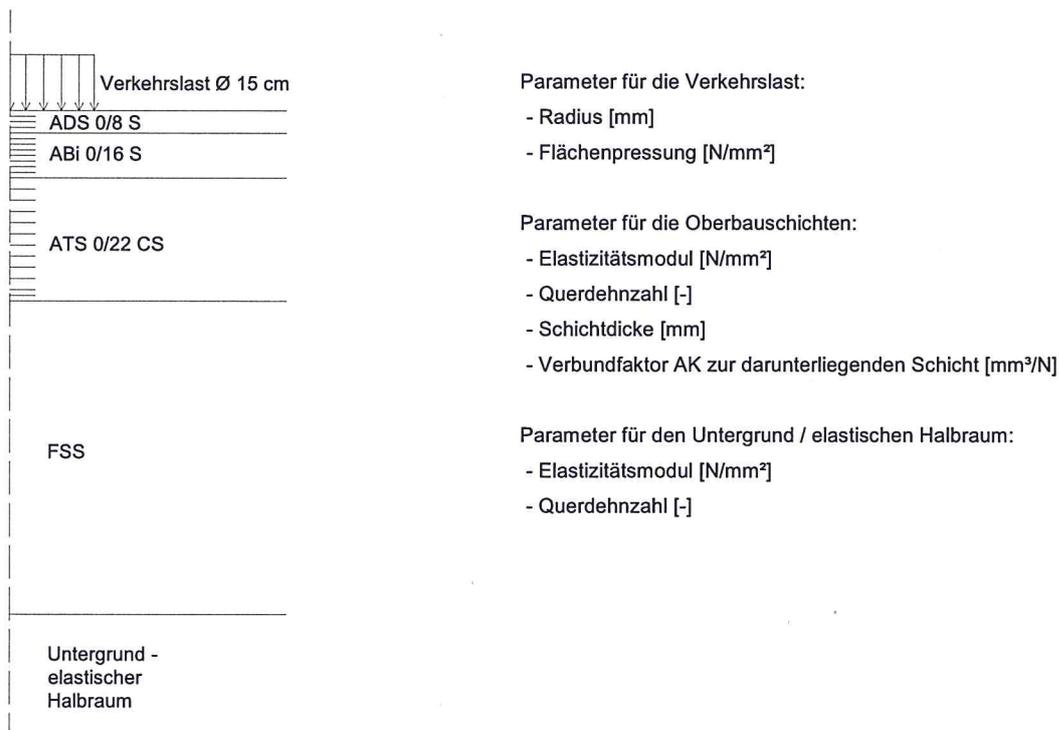


Abbildung 17: Modellierung der Straßenbefestigung mit der Mehrschichtentheorie (BISAR)

Für die Betrachtung der Beanspruchung in der Schichtengrenzfläche und des Einflusses des Schichtenverbundes auf das Spannungs- und Verformungsverhalten der Straßenbefestigung wurde die Berechnung an den in Abbildung 18 und Tabelle 1 dargestellten Punkten durchgeführt.

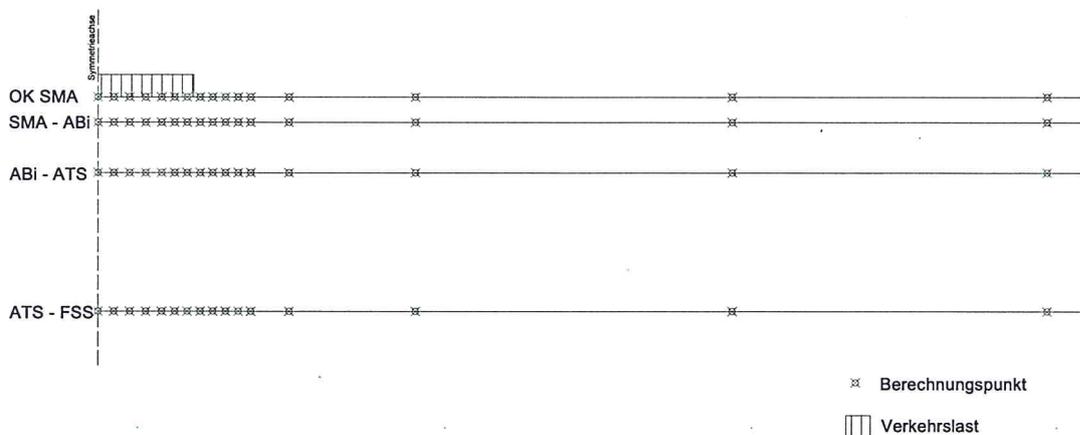


Abbildung 18: Grafische Darstellung der Berechnungspunkte der BISAR-Berechnungen

Tiefe	Radius
Oberseite Asphaltdeckschicht	0 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm,
Unterseite Asphaltdeckschicht	100 mm, 120 mm, 140 mm, 160 mm,
Oberseite Asphaltbinderschicht	180 mm, 200 mm, 240 mm, 300 mm,
Unterseite Asphaltbinderschicht	500 mm, 1000 mm, 1500 mm
Oberseite Asphalttragschicht	
Unterseite Asphalttragschicht	

Tabelle 1: Tiefe und Radius der Berechnungspunkte

An diesen Punkten wurden jeweils die in Abbildung 19 dargestellten Spannungen berechnet und ausgewertet:

σ_{rr} Radialspannung

σ_{zz} Vertikalspannung

σ_{rz} Scherspannung an der Schichtgrenze

Δu Relativverschiebung

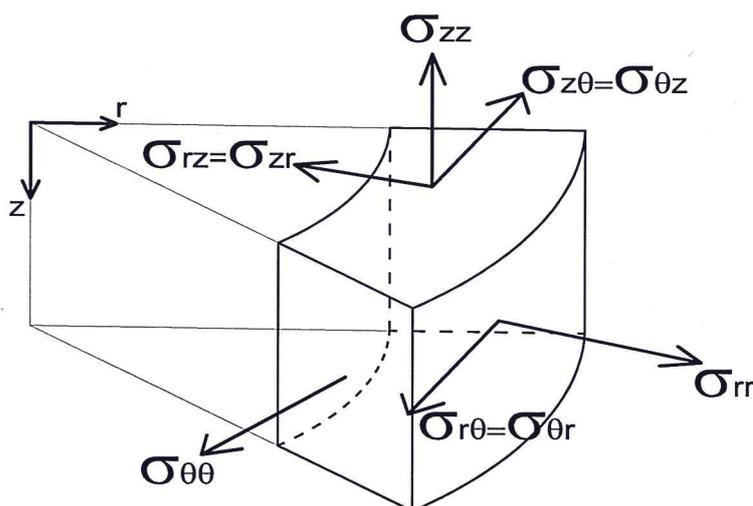


Abbildung 19: Spannungen am Volumenelement (Shell, 1979)

Die Steuerung des Verbundes zwischen den Schichten erfolgt bei dem Programm BISAR über die Eingabe des Verbundfaktors AK (Gleichung 1) für die Grenzfläche zwischen zwei Schichten. Der im Programm vorgesehene Bereich für den Schichtenverbund liegt zwischen $AK=0$ (voller Verbund) und $AK=1.000.000$ (vollständig aufge-

hobener Verbund, Schichten liegen reibungslos aufeinander). Es ist jedoch festzustellen, dass bei einem Verbundfaktor $AK = 10$ bereits Beanspruchungen in der Befestigung berechnet werden, welche sich kaum von denen bei $AK = 1.000.000$ unterscheiden. Der Verbundfaktor berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$AK = \frac{\Delta U}{\sigma_{rz}} \quad \text{Gleichung 1}$$

AK	Verbundfaktor	[mm ³ /N]
σ_{rz}	Scherspannung	[N/mm ²]
Δu	Relativverschiebung	[mm]

Der Verbundfaktor AK stellt einen Proportionalitätsfaktor von Relativverschiebung zu Scherspannung an einem vorgegebenen Berechnungspunkt dar. Die Relativverschiebung ist dabei die Differenz der horizontalen Verschiebung zwischen einem Punkt an der Unterseite der oberen Schicht und dem Punkt an der Oberseite der unteren Schicht, wenn die Punkte am unbelasteten System die gleichen Koordinaten (Radius und Tiefe) hatten. Aus Formel (3) folgt auch, dass die Relativverschiebung bei $AK=0$ gleich Null sein muss.

5.2. Ausgewählte Straßenbefestigungen

Für die Festlegung der Versuchsbedingungen wurden 4 differente Straßenbefestigungen nach Tabelle 2 in Anlehnung an die RStO 01 [12] ausgewählt. Jede Befestigung wurde mit unterschiedlichen Verbundfaktoren zwischen 0 und 10 sowie bei 3 verschiedenen Temperaturen von -12,5°C, 17,5°C und 47,5°C an der Befestigungsoberfläche berechnet. Als Verkehrslast wurde die in Deutschland maximal zulässige Achslast von 11,5 t angenommen. Bei einem Radius von 150 mm für die belastete Fläche zwischen Fahrbahn und Rad erhält man für die halbe Achslast eine Flächenpressung von 0,81 N/mm².

Befestigung	Bedeutung
Variante 1	3-schichtige Standardbefestigung nach RStO 01 Tafel 1, Zeile 1, Bkl. SV
Variante 2	3-schichtige Befestigung mit geringen Schichtdicken in Anlehnung an RStO 01 Tafel 1, Zeile 3.2, Bkl III
Variante 3	2-schichtige Befestigung mit Asphaltdecke auf sehr dicker Asphalttragschicht ohne Binderschicht
Variante 4	2-schichtige Befestigung mit dünner Asphalttragschicht nach RStO Tafel 1, Zeile 1, Bkl VI

Tabelle 2: Ausgewählte Befestigungen

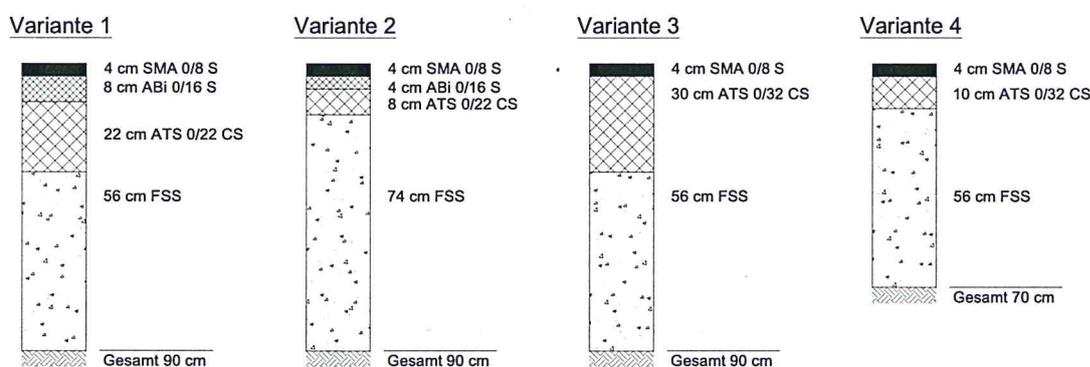


Abbildung 20: Grafische Darstellung der ausgewählten Befestigungen

Für die Berechnungen zur Festlegung der Versuchsbedingungen wurden die Elastizitätsmoduln nach FRANCKEN und VERSTRAETEN [13] für 3 unterschiedliche Temperaturverteilungen im Asphaltpaket (Oberflächentemperatur $-12,5^{\circ}\text{C}$, $17,5^{\circ}\text{C}$ und $47,5^{\circ}\text{C}$) angenommen.

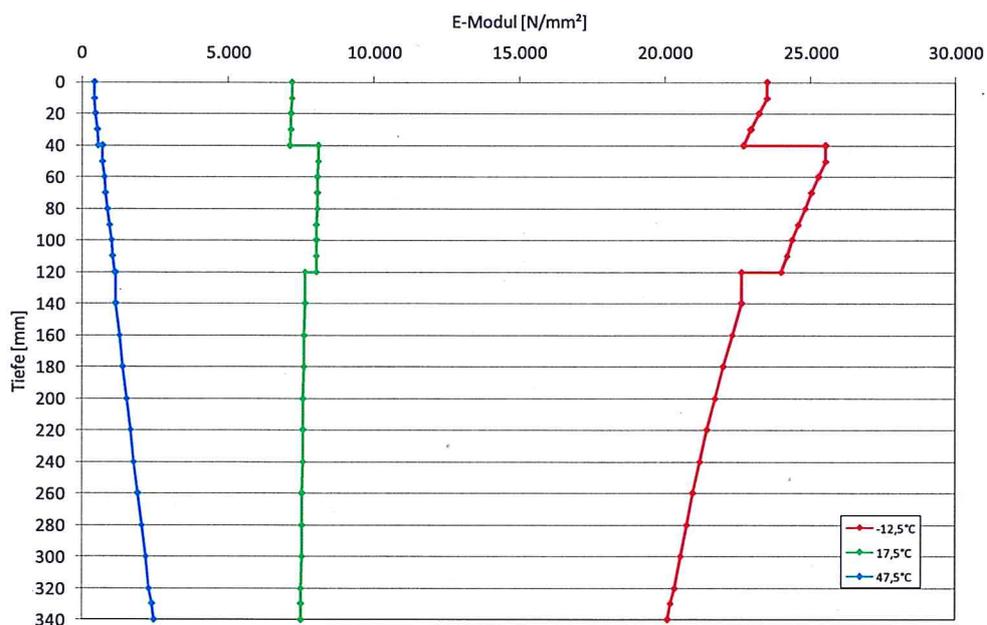


Abbildung 21: Grafische Darstellung E-Moduln in Abhängigkeit von der Temperatur und Schichttiefe nach [14]

5.3. Ergebnisse der Berechnungen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Berechnungen für die Befestigungsvariante 1 in Diagrammen dargestellt und kurz erläutert. Die Ergebnisse für die Varianten 2 bis 4 wurden in der Anlage 1 eingefügt.

5.3.1. Vertikalspannungen an den Schichtgrenzen

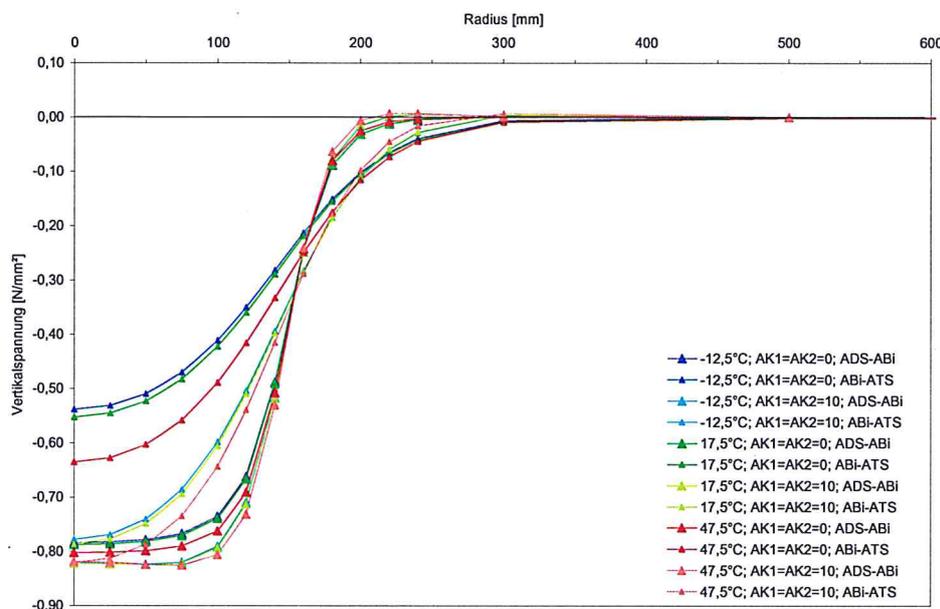


Abbildung 22: Variante 1, Vertikalspannungen an den Schichtengrenzen

In Abbildung 22 sind die berechneten Vertikalspannungen für Variante 1 in Abhängigkeit vom Radius jeweils für die Schichtengrenzflächen Deck-/Binderschicht (ADS-ABi) und Binder-/Tragschicht (ABi-ATS) dargestellt. Die Berechnungen wurden für 2 Verbundvarianten durchgeführt:

- vollständiger Verbund zwischen Deck- und Binderschicht sowie Binder- und Tragschicht (AK1=AK2=0, Symbole: große Dreiecke)
- geringer Verbund zwischen Deck- und Binderschicht sowie zwischen Binder- und Tragschicht (AK1=AK2=10, Symbole: kleine Dreiecke)

Die Vertikalspannungen zwischen der Deckschicht und der Binderschicht sind relativ unabhängig von der Temperatur und dem AK-Wert. An der Grenze zwischen der Binder- und Tragschicht wird die Vertikalspannung mit größerem AK-Wert und höherer Temperatur jedoch viel größer. Ohne Schichtenverbund (AK=10) ist die Vertikalspannung in der Lastachse an der Grenze ABi-ATS etwa gleich groß wie an der Grenze ADS-ABi, bei vollständigem Schichtenverbund (AK=0) jedoch an der unteren Schichtengrenze etwa um ein Drittel geringer. Bei vollständigem Verbund wird die Vertikalspannung über einen deutlich größeren Bereich in die darunterliegende ungebundene Frostschutzschicht abgetragen. Bei den Varianten 1, 3 und 4 treten bei den Berechnungsvarianten ohne Verbund (AK=0) zwischen Deck- und Binderschicht

geringe Vertikalkräfte mit positivem Vorzeichen auf, dies kann man als auftretende Vertikalzugkräfte zwischen diesen beiden Schichten interpretierten.

5.3.2. Scherspannungen an den Schichtgrenzen

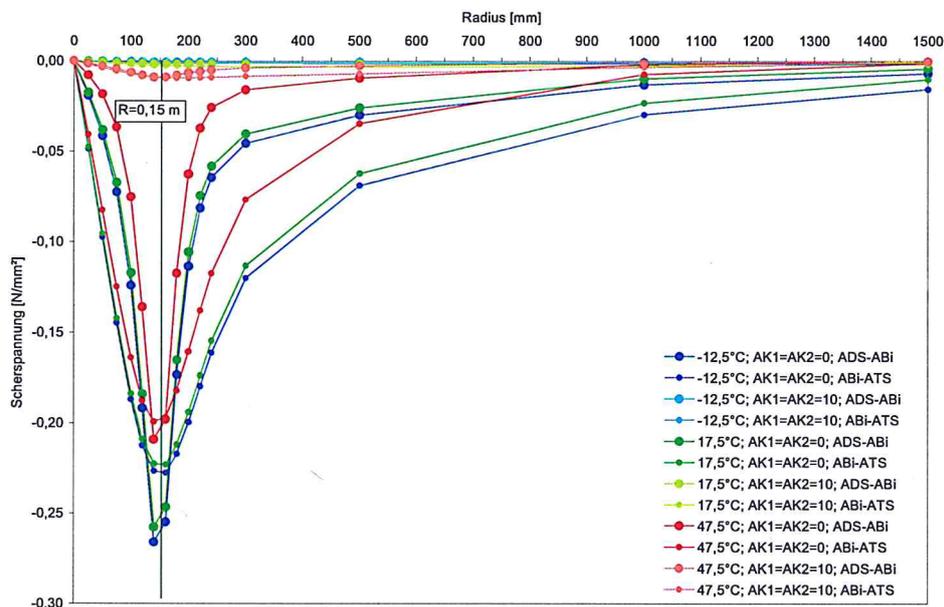


Abbildung 23: Variante 1, Scherspannungen an den Schichtengrenzen

In Abbildung 23 sind die berechneten Scherspannungen an den Schichtengrenzen ADS-ABi und ABi-ATS über den Radius dargestellt. Bei vollem Verbund (AK=0) zwischen den Schichten hat die Scherspannung bei einem Abstand von 15 cm von der Lastachse (entspricht dem Rand der belasteten Kreisfläche) ihr Maximum. Dieses Maximum ist an der Grenze ADS-ABi ausgeprägter als an der Grenze ABi-ATS. Ein geringer Schichtenverbund (AK=10) hat eine sehr deutliche Verringerung der Scherspannung zur Folge. Die Scherspannungen betragen in diesem Fall kaum noch 5 % von den bei vollem Verbund berechneten Spannungen. Bei hohen Temperaturen und vollständigem Verbund sind die Scherspannungen um etwa 25 % geringer als bei niedrigen Temperaturen. Aus der berechneten Variante 4 ergibt sich, dass bei dünnen Befestigungen die Scherspannungen deutlich größer als bei Befestigungen mit großen Schichtdicken sind.

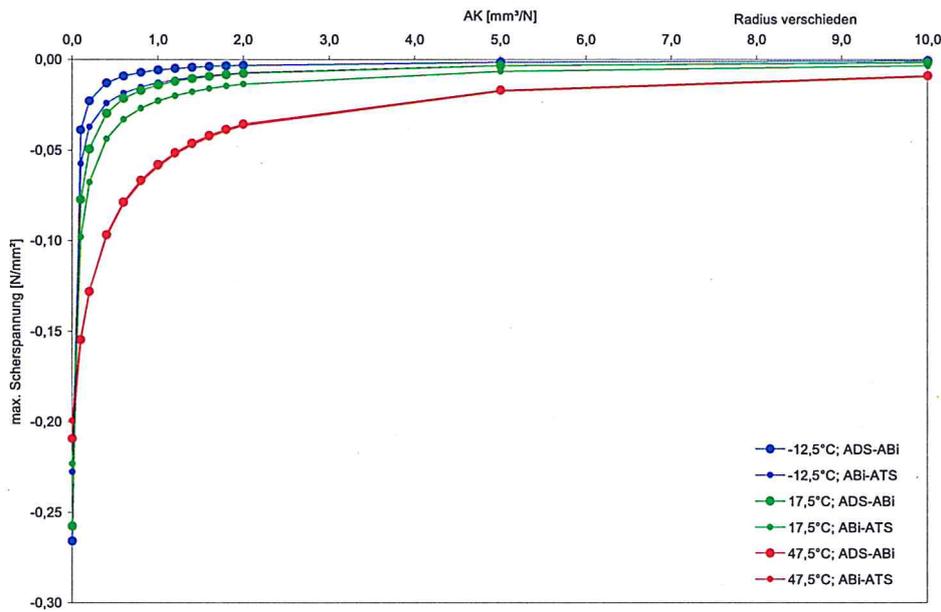


Abbildung 24: Variante 1, Maximale Scherspannungen an den Schichtgrenzen

Die maximalen Scherspannungen treten immer bei vollem Schichtenverbund auf. Dabei werden bei niedrigen Temperaturen etwas größere Scherspannungen berechnet, als bei hohen Temperaturen. Die Abbildung 24 zeigt, dass insbesondere bei niedrigen Temperaturen die maximalen Scherspannungen bei geringerem Schichtenverbund sehr schnell viel kleiner werden, während der Abfall der Scherspannungen bei hohen Temperaturen weitaus geringer ist.

5.3.3. Relativverschiebungen an den Schichtengrenzen

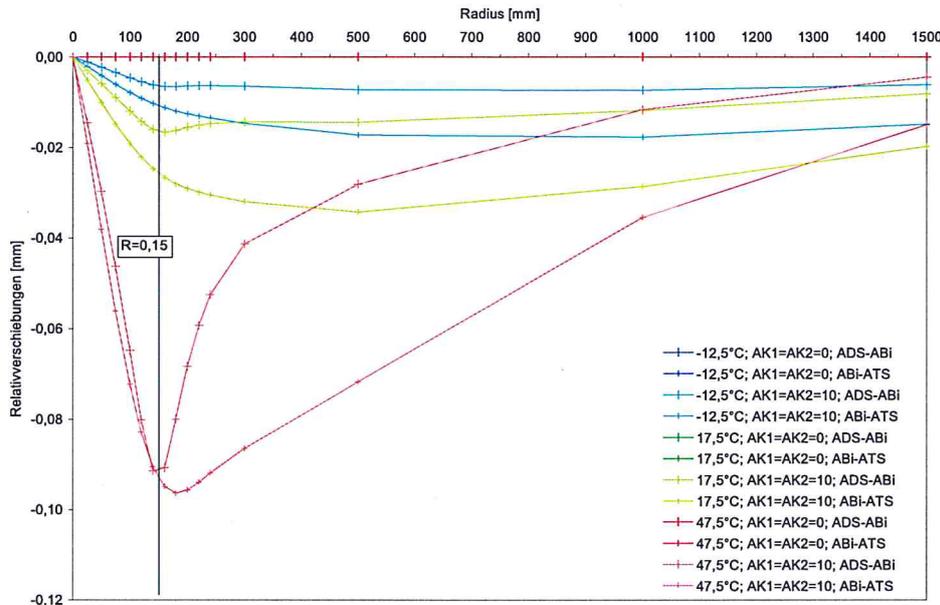
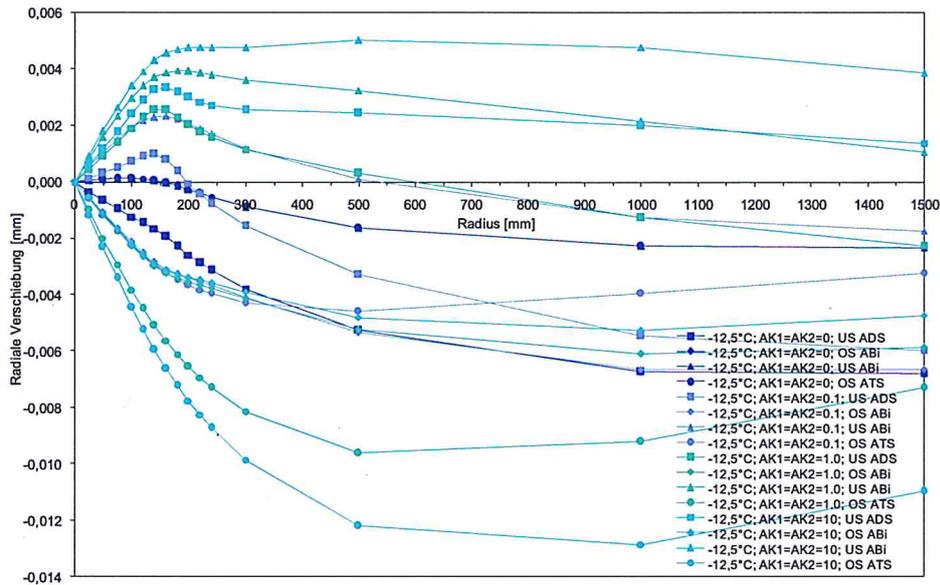
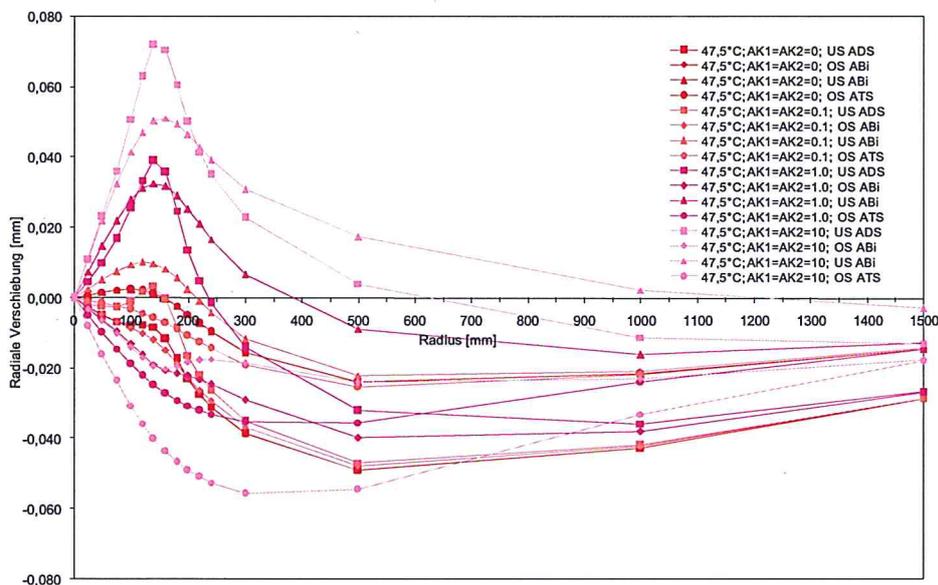


Abbildung 25: Variante 1, Relativverschiebungen an den Schichtengrenzen

In Abbildung 25 sind die Relativverschiebungen zwischen den Schichten über den Radius der berechneten Befestigung dargestellt. Bei vollständigem Verbund der Schichten ($AK_1=AK_2=0$) treten entsprechend den theoretischen Grundlagen zur Mehrschichtentheorie gar keine Relativverschiebungen auf. Bei einem AK-Faktor größer Null sind Relativverschiebungen als Differenz der Verschiebungen eines Punktes an der Unterseite der oberen Schicht gegenüber dem (koordinatengleichen Punkt ohne Verkehrsbelastung) an der Oberseite der unteren Schicht möglich. Dabei treten bei geringem Schichtenverbund ($AK=10$) an der Grenze ABi-ATS deutlich größere Relativverschiebungen als an der Grenze ADS-ABi auf. Bei hohen Temperaturen treten die maximalen Relativverschiebungen am Rand der belasteten Fläche ($R = 15 \text{ cm}$) auf. Bei Berechnungen mit geringem Verbund zwischen den Asphalt-schichten verschieben sich die Maxima der Relativverschiebungen bei geringeren Beträgen mit abnehmender Temperatur von der Lastachse weg.

Abbildung 26: Variante 1, radiale Verschiebung, Oberflächentemperatur $-12,5^{\circ}\text{C}$ Abbildung 27: Variante 1, radiale Verschiebung, Oberflächentemperatur $47,5^{\circ}\text{C}$

Die Abbildung 26 zeigt die berechneten radialen Verschiebungen über den Radius getrennt für die zwei Schichtengrenzen für eine Oberflächentemperatur des Asphaltpaketes von $-12,5^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von den AK-Faktoren. Dabei ist die Ursache für die in Abbildung 25 berechneten zwei Maxima bei einer Oberflächentemperatur von $-12,5^{\circ}\text{C}$ erkennbar. Die Schichten verformen sich bei teilweisem Verbund unabhängig

voneinander, so dass die radiale Verschiebung der Unterseite der oberen Schicht den Maximalwert bei etwa 15 cm Abstand zur Lastachse erreicht, während die maximalen radialen Verschiebungen auf der Oberseite der unteren Schicht bei ca. 150 cm Abstand von der Lastachse berechnet werden. Die in Abbildung 27 dargestellten radialen Verschiebungen bei Oberflächentemperaturen von 47,5°C weisen einen prinzipiell ähnlichen Verlauf auf, jedoch sind die Beträge der radialen Verschiebungen größer und die Abstände der Maxima zur Lastachse kleiner als bei tiefen Temperaturen.

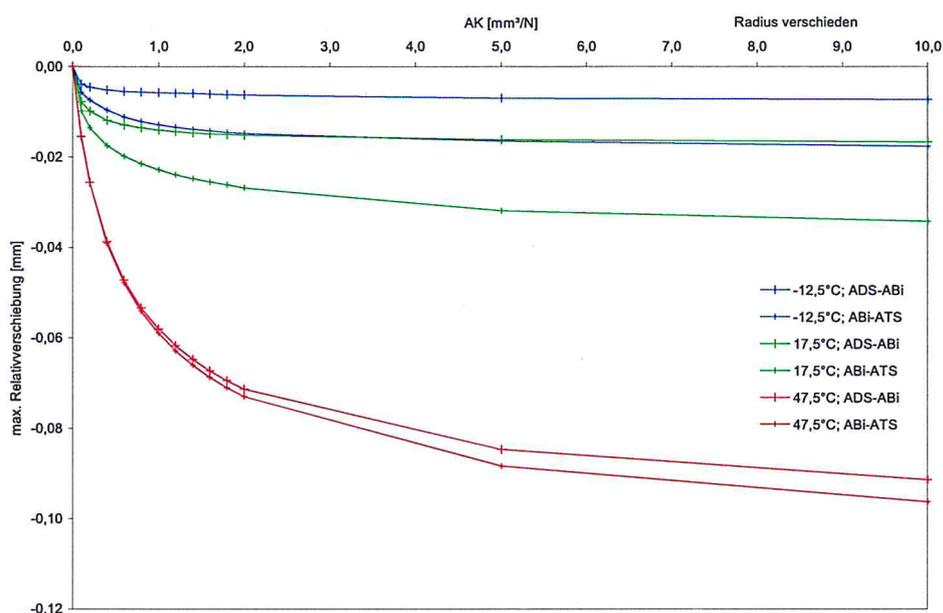


Abbildung 28: Variante 1, Maximale Relativverschiebungen an den Schichtgrenzen

Betrachtet man die in der Abbildung 28 dargestellten maximal auftretenden Relativverschiebungen unabhängig vom Radius, ist zu erkennen, dass bei geringer werdendem Schichtenverbund (höherer AK-Wert) die Relativverschiebungen stark ansteigen. Der Anstieg ist von der Tiefe (Grenze ADS-ABi bzw. ABi-ATS) und von der Temperatur abhängig. Die größeren Verschiebungen treten temperaturunabhängig an der unteren Schichtengrenze (ABi-ATS) auf. Während bei der Berechnungsvariante mit niedriger Oberflächentemperatur (-12,5°C) ab einem AK-Faktor von 0,1 mm³/N kein weiterer Anstieg der Relativverschiebung zu verzeichnen ist, nimmt die Relativverschiebung auch bei hohen Oberflächentemperaturen (47,5°C) bei AK-Faktoren von über 5,0 mm³/N weiter zu.

5.3.4. Radialspannungen an den Schichtengrenzen

In der Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ist die für die Dimensionierung relevante Radialspannung an den Schichtengrenzflächen in Abhängigkeit vom AK-Faktor bei einer Oberflächentemperatur von $-12,5^{\circ}\text{C}$ dargestellt. Die Verläufe der Radialspannung ändern sich mit abnehmendem Verbund grundlegend. Während die Radialdruckspannung an der Oberseite der Befestigung kleiner wird, wird die Radialzugspannung an der Unterseite der Befestigung deutlich größer. Damit nimmt auch die Ermüdungsanfälligkeit der Asphalttragschicht zu. Während bei vollständigem Verbund die Radialspannung an den zwei Schichtengrenzflächen (ADS-ABi, ABi-ATS) nur E-Modul-bedingte Unstetigkeitsstellen aufweist, wird bei abnehmendem Verbund die Radialspannung an der Unterseite einer Schicht größer (bei höherem AK-Faktor Auftreten von Radialzugspannungen!) und an den Oberseiten der Schicht kleiner (größere Radialdruckspannungen).

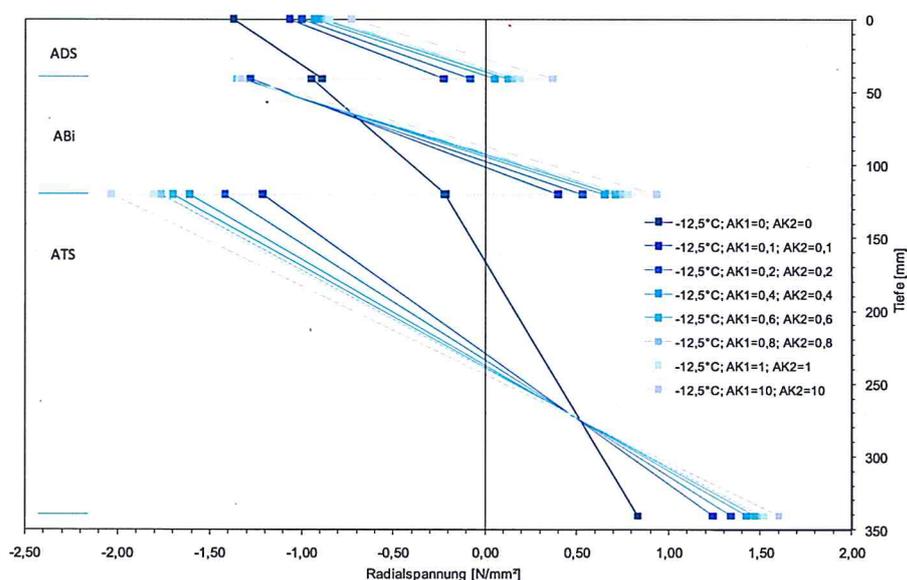


Abbildung 29 Variante 1, Radialspannungen in der Lastachse, Oberflächentemperatur $-12,5^{\circ}\text{C}$

Das gleiche Bild ergibt sich bei Oberflächentemperaturen von $47,5^{\circ}\text{C}$, jedoch treten an der Unterseite der Asphaltdeckschicht keine Radialzugspannungen auf.

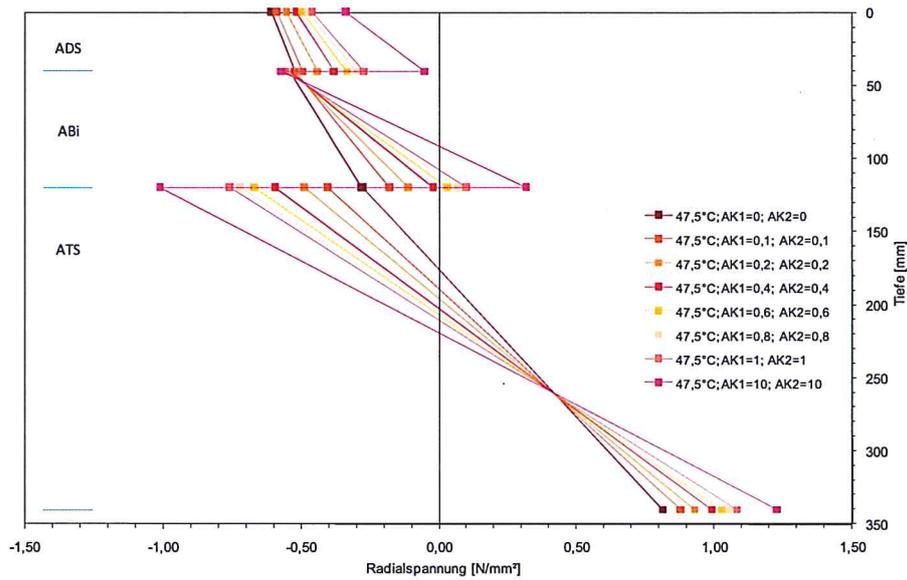


Abbildung 30: Variante 1, Radialspannungen in der Lastachse, Oberflächentemperatur 47,5°C

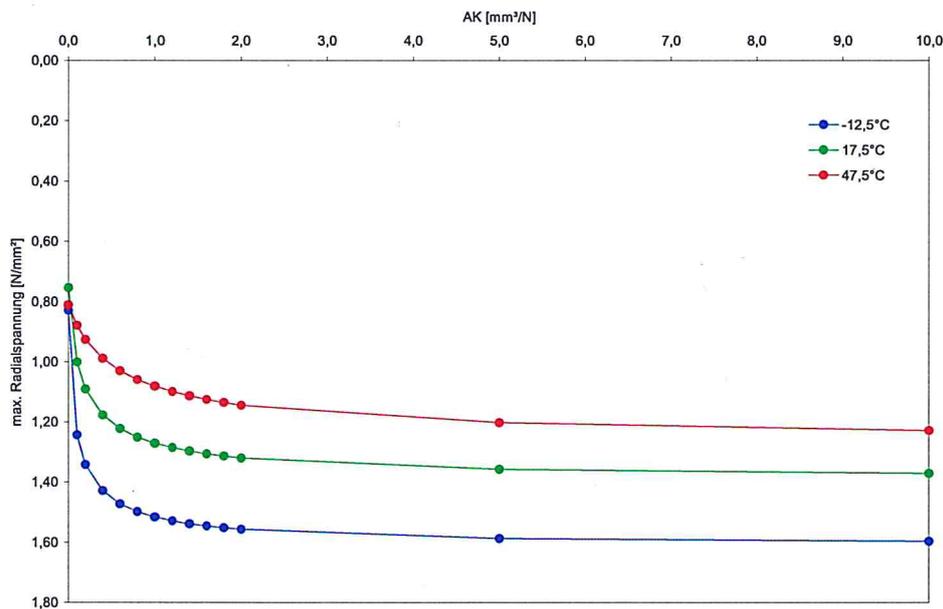


Abbildung 31: Variante 1, Maximale Radialspannungen an der Asphaltpaket-Unterseite

In der Abbildung 31 sind die maximalen Radialspannungen in der Lastachse an der Unterseite des Asphaltpaketes dargestellt. Bei vollem Verbund hat die Temperatur einen relativ geringen Einfluss auf die berechnete Radialspannung. Bei geringerem Verbund wird der Einfluss der Temperatur jedoch weit größer. Die berechnete Radialspannung an der Unterseite der ATS ist bei einer Oberflächentemperatur von -

12,5°C bei geringem Verbund ($AK=10$) etwa doppelt so groß, wie bei vollem Verbund. Darüber hinaus ist bei einem nur geringfügig verminderten Verbund mit einem AK -Faktor von 0,1 mm³/N ein Anstieg der Radialspannung von 50 % gegenüber vollem Verbund zu verzeichnen. Bei Oberflächentemperaturen von 47,5°C ist der Anstieg der Radialspannung deutlich geringer und erreicht bedingt durch die geringeren Schicht-E-Moduli geringere Beträge.

5.3.5. Vergleich der Vertikal- und Scherspannung

In Abbildung 32 sind die Scherspannung und Vertikalspannung über den Radius gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass die maximale Vertikalspannung nur im Bereich der Lastachse auftritt, jedoch am Rand der belasteten Fläche – in dem die maximale Scherspannung auftritt – nur noch etwa halb so groß ist. Die Scher- und Vertikalspannungen sind jeweils abhängig vom Radius. Die Maximalwerte der Spannungen treten nie bei gleicher Entfernung von der Lastachse auf. Dieser Umstand ist für die Entwicklung der Prüfvorrichtung und des Versuchsprogramms gleichermaßen von Bedeutung.

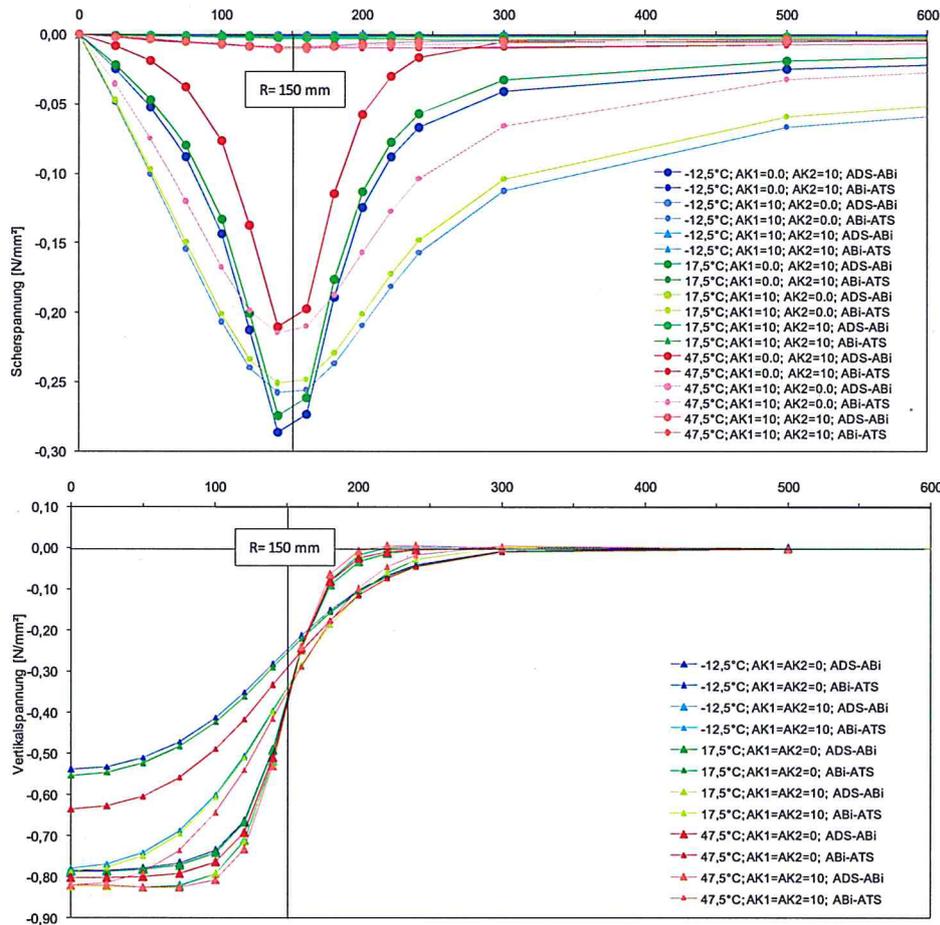


Abbildung 32: Variante 1, Gegenüberstellung von Scher- und Vertikalspannungen

5.3.6. Vergleich der berechneten Relativverschiebungen

Für die vier berechneten Befestigungsvarianten sind in Abbildung 33 die maximalen Relativverschiebungen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Entsprechend den Berechnungen sind die maximalen Relativverschiebungen bei der dünnen dreischichtigen Befestigung nach Variante 2 temperaturunabhängig etwa doppelt so groß, wie bei der dicken dreischichtigen Variante 1. Bei der dünnen zweischichtigen Variante 4 sind die maximalen Relativverschiebungen nur bei der Oberflächentemperatur von 47,5°C größer als bei der dünnen dreischichtigen Variante 2.

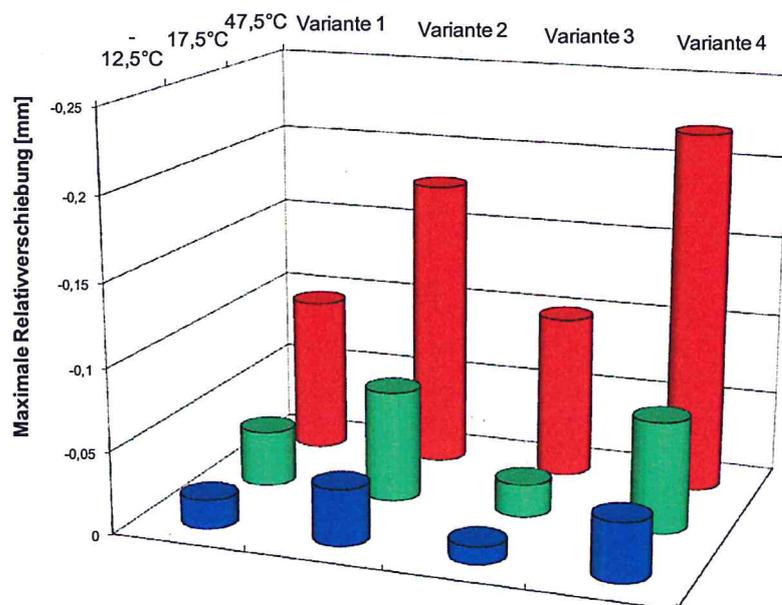


Abbildung 33: Vergleich der berechneten Relativverschiebungen für die Varianten 1 bis 4

Die maximalen Scherspannungen, bestimmt mit Verbundfaktor $AK=0$, sind für alle vier Befestigungsvarianten in Abbildung 34 dargestellt. Die Scherspannungen sind, ähnlich wie die Relativverschiebungen, bei der dicken dreischichtigen Variante 1 am geringsten und bei der dünnen zweischichtigen Variante am größten. Die berechneten Scherspannungen sind bei der dünnen dreischichtigen Variante 2 ebenso wie die Relativverschiebungen deutlich größer als bei der dicken dreischichtigen Variante 1.

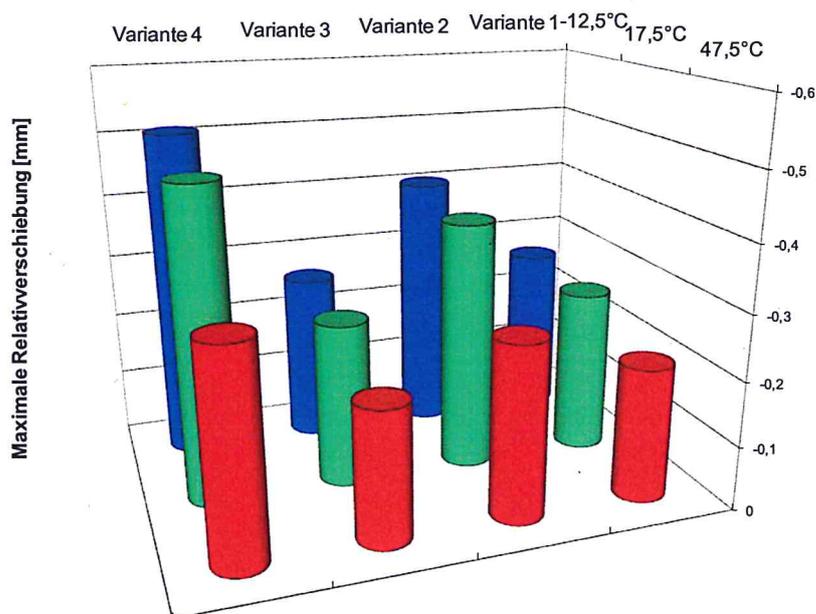


Abbildung 34: Vergleich der berechneten Scherspannungen für die Varianten 1 bis 4

5.3.7. Schlussfolgerungen

Die Scherspannungen und Relativverschiebungen zwischen den Schichten sind wechselseitig abhängig vom Verbundfaktor. Bei niedrigem Verbundfaktor (hoher Verbundwirkung) sind die Scherspannungen hoch und die Relativverschiebungen gering. Bei hohem Verbundfaktor (geringer Verbund) zeigt sich das Verhalten der Scherspannungen zu den Relativverschiebungen umgekehrt. Ohne dynamische Versuche zum Schichtenverbund mit der Bestimmung der Schersteifigkeit lässt sich nur ein Bereich für die mutmaßlich auftretenden Scherspannungen und Relativverschiebungen (Scherwege) angeben. Zur Festlegung der Versuchsparameter sind in Abbildung 35 die Grenzwerte der Relativverschiebungen dargestellt. Diese können bei weggesteuerten dynamischen Versuchen als Vorgabewerte für die Scherwege genutzt werden.

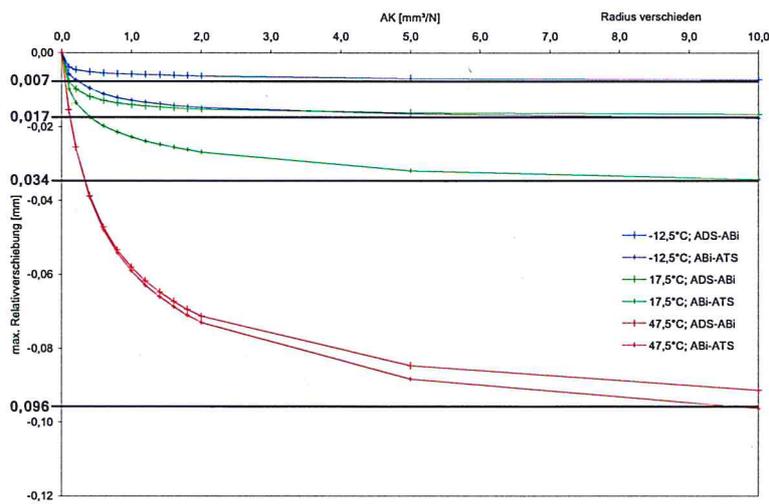


Abbildung 35: Variante 1, maximale Scherspannungen und Markierung der temperaturabhängigen Grenzwerte

6. Technische Beschreibung der verwendeten Prüfvorrichtungen

Für das vorliegende Forschungsprojekt zur Untersuchung des Schichtenverbundes von Asphaltbefestigungen werden zwei Prüfvorrichtungen verwendet. Zum einen die neuentwickelte Prüfvorrichtung für dynamische Versuche mit Normalspannung, die in Zusammenarbeit mit der Fa. Freundl Maschinenbau Wenningsen hergestellt wurde. Sie ermöglicht die, entsprechend den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Anforderungen, beanspruchungsgerechte Prüfung des Schichtenverbundes. Weiterhin wurde eine statische Prüfvorrichtung (hergestellt von Fa. Freundl Maschinenbau Wenningsen) zur Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER [1] verwendet, um einen Vergleich der dynamischen mit den statischen Versuchen zu ermöglichen.

Beide Prüfvorrichtungen wurden in der Temperierkammer der servohydraulischen Prüfmaschine SHM 63 (Abbildung 36) der Professur für Straßenbau an der TU Dresden eingesetzt. Die Temperierung erfolgte jeweils durch ein Luftbad mit konstantem Luftstrom von 200 l/min. Die an der Prüfmaschine eingesetzten Messgeräte sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Messgerätetyp	Messgerät	Messbereich	Genauigkeitsklasse	Messfehler
Wegaufnehmer	HBM WA 2	0 bis 2 mm	0,1	<0,002 mm
Wegaufnehmer	HBM WA 50	0 bis 50 mm	0,1	< 0,05 mm
Kraftmessdose	GTM Serie K 10 kN	+/- 10 kN	0,02	0,1 kN bis 10 kN < 0,4 % 0,04 kN bis 0,1 kN < 0,8 %
Steuerung	DOLI EDC 580 sowie Software Test and Motion	bis 1.666 MW/s		

Tabelle 3: Spezifikation der eingesetzten Messtechnik



Abbildung 36: Prüfmaschine SHM 63 der TU Dresden

6.1. Dynamische Prüfvorrichtung

Die dynamische Prüfvorrichtung wurde unter der Maßgabe entwickelt, dass die in einer Straßenbefestigung auftretenden Einflussgrößen auf den Schichtenverbund beanspruchungsgerecht geprüft werden können. Die Entwicklung der Vorrichtung erfolgte bewusst für Bohrkerne, um die aufwändige Probekörperherstellung der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Prüfvorrichtungen zu vermeiden. Die Prüfvorrichtung wurde so konstruiert, dass die folgenden Parameter mit den Versuchen abgedeckt werden können:

- weggeregelter Versuch mit Scherwegen bis 0,25 mm (technisch möglicher Scherweg bis +/- 10 mm)
- Abstand der Scherbacken zwischen >0 bis 15 mm
- Normalkraft (statisch) 0 bis 1,1 N/mm²
- Prüftemperaturen von -25 bis +65°C
- Messung der induzierten Scherkraft

In der in Abbildung 37 dargestellten Prüfvorrichtung wird der Probekörper (Bohrkern Ø 100 mm) mit einem 2-Komponenten-Kleber aus Epoxidharz (SIKA Sikadur 30) in 4

Halbschalen aus Stahlrohr eingeklebt. Die Halbschalen weisen Innendurchmesser von 97 mm, 100 mm oder 103 mm auf, damit eine Anpassung an technisch bedingte Abweichungen der Bohrkronen möglich ist. Die unteren Halbschalen werden auf zwei Aluminiumträger montiert, davon ist einer horizontal über eine spielarme kugelgeführte Schiene und der andere vertikal über zwei Kugelbüchsen mit Linearkugellagern beweglich angebracht. Über den vertikal beweglichen Träger wird die Scherkraft bzw. der Scherweg auf den Probekörper aufgebracht. Der horizontal bewegliche Träger dient der Übertragung der Normalkraft und der Einstellung des Abstandes zwischen den unteren Halbschalen. Die oberen Halbschalen werden unmittelbar mit den oberen Aluminiumträgern verschraubt, welche wiederum mit den unteren Trägern verschraubt werden. Durch diese zur zusätzlichen Verschraubung angeordnete Schrauben können die unteren und oberen Träger gegeneinander verspannt werden, so dass jeweils steife Rahmen entstehen. Dadurch wird eine Deformation des Probekörpers in vertikaler Richtung bei wiederholter dynamischer Beanspruchung verhindert.

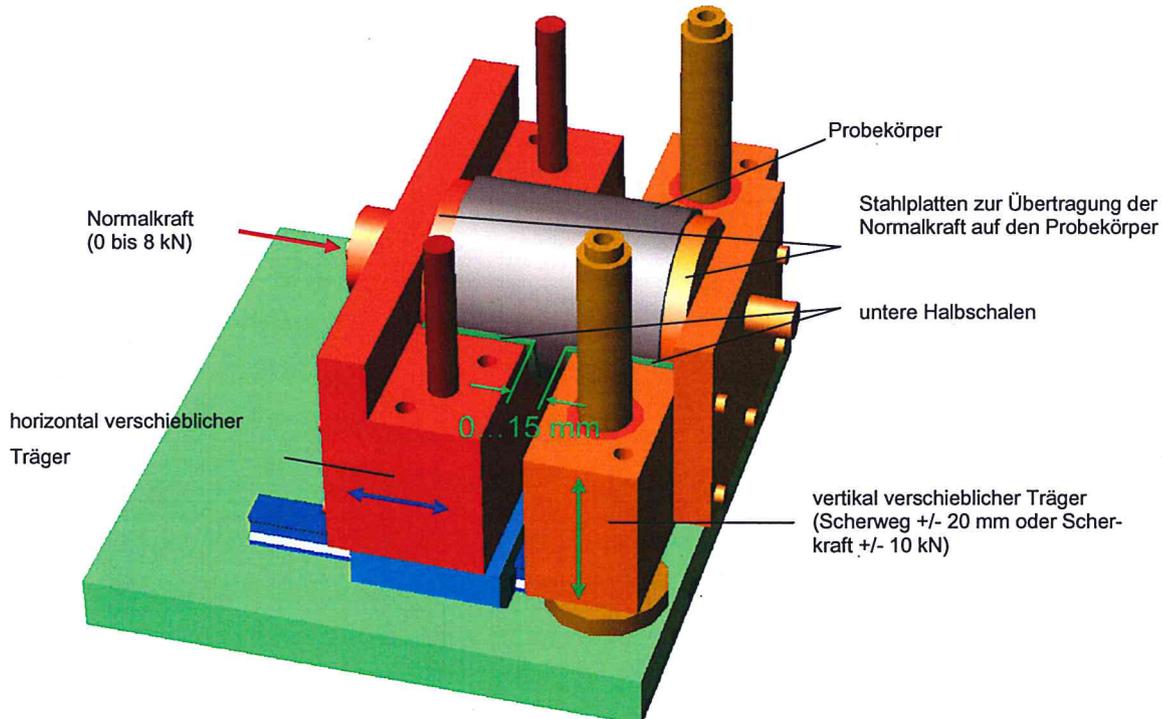


Abbildung 37: Schematische Darstellung der offenen Prüfvorrichtung

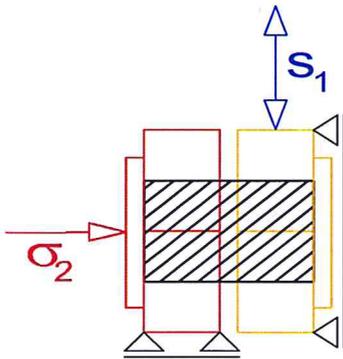


Abbildung 38: Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung

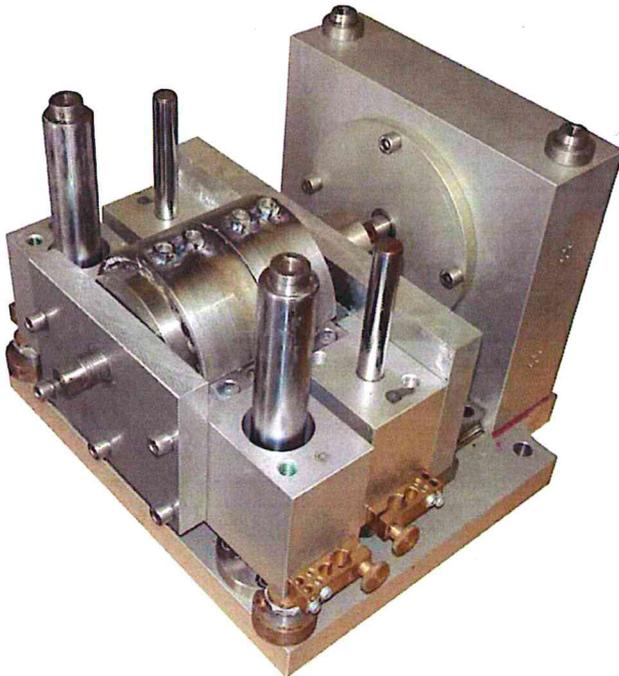


Abbildung 39: Prüfvorrichtung (offen) mit Probekörper

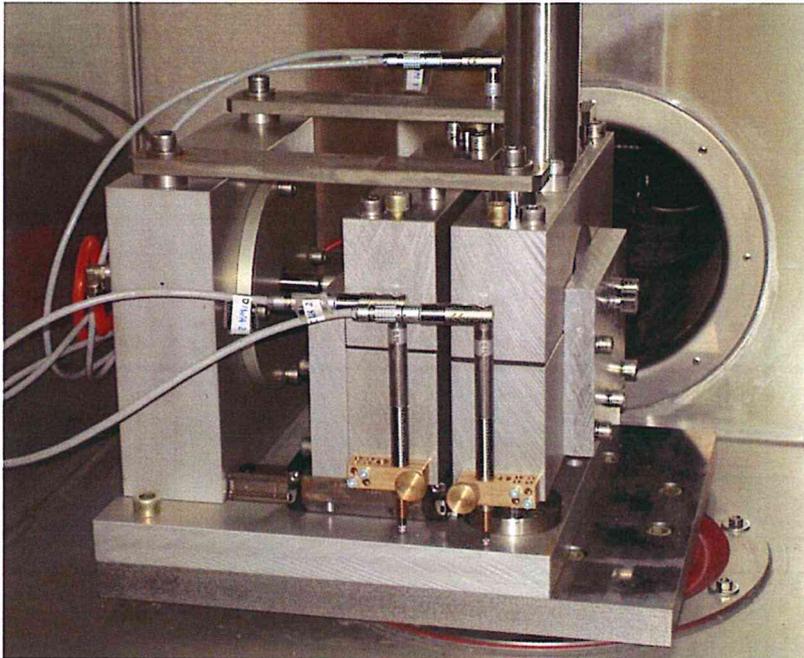


Abbildung 40: Prüfvorrichtung (geschlossen)

Die Scherbeanspruchung des Probekörpers erfolgt durch den Hydraulikzylinder der servohydraulischen Prüfmaschine. Die Belastung wurde dynamisch weggeregt in Sinusschwingungen, gesteuert über den Kolbenweg, aufgebracht und als Scherwechselbeanspruchung ausgeführt. Die resultierenden Scherwege wurden an der Prüfvorrichtung mit zwei induktiven Wegaufnehmern am vertikal beweglichen Teil der Prüfvorrichtung gemessen. Um das nicht vermeidbare Spiel des horizontal auf Linearkugellagern beweglichen Teils auf der Schiene zu erfassen wurde auch dort auf jeder Seite der Prüfvorrichtung der vertikale Weg aufgezeichnet.

Die ersten Tastversuche mit der Prüfvorrichtung wurden mit einer Kraftregelung durchgeführt. Es hat sich jedoch schon beim ersten Versuch gezeigt, dass mit zunehmender Lastwechselzahl die vertikale bleibende Auslenkung bis zum Bruch der Schichtengrenzfläche zugenommen hat. Um die bleibende Auslenkung zu vermeiden, wurden die Versuche auf eine Wegregelung umgestellt. Diese erfolgte durch den SSI-Wegaufnehmer im Hydraulikkolben.

Beim Einbau der Probekörper und dem Anbringen des Lastgestänges wurde mit Hilfe der induktiven Wegaufnehmer die Lage des Probekörpers im vertikal beweglichen Träger durch Nachregelung konstant gehalten.

Die statische Normalkraft wird über einen Pneumatikzylinder im Widerlager der Prüfvorrichtung aufgebracht, dessen Kraft über ein Manometer am Kompressor eingestellt wird. Die erzielte Normalkraft des Pneumatikzylinders wurde in einer Prüfmaschine getestet, indem mit der Kraftmessdose die Normalkraft in Abhängigkeit vom Kompressordruck aufgezeichnet wurde. Die Messung der erzielten Normalkraft bei eingestellten Drücken bis 8,0 bar ist in Abbildung 41 dargestellt.

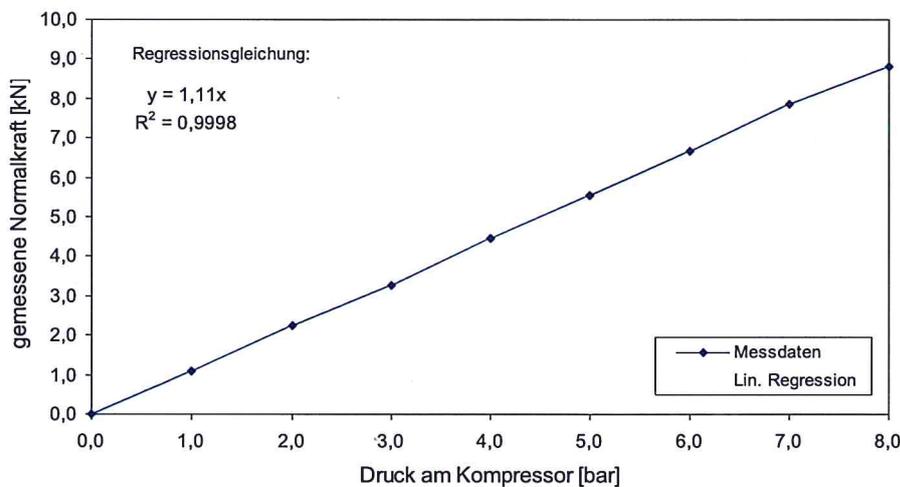


Abbildung 41: Normalkraft-Test

Mit Hilfe der Gleichung 2 lässt sich die Normalkraft mit dem Manometer am Kompressor mit ausreichender Genauigkeit einstellen.

$$N = 1,11 * P$$

Gleichung 2

N	Normalkraft	[kN]
P	Kompressordruck	[bar]

Die aus der aufbrachten Normalkraft resultierende Normalspannung n an der Schichtengrenzfläche ergibt sich aus Gleichung 3.

$$n = \frac{1,11 * 1000 * P}{0,25 * d^2 * \pi}$$

Gleichung 3

n	Normalspannung	[N/mm ²]
P	Kompressordruck	[bar]
d	Probekörperdurchmesser	[mm]

Die maximal erreichbare Normalspannung bei einem Kompressordruck von 8 bar und einem Probekörperdurchmesser von 100 mm beträgt 1,13 N/mm². Bedingt durch die Ablesegenauigkeit des Manometers von +/- 0,1 bar beträgt die Abweichung der Normalspannung +/- 0,0141 N/mm².

6.2. Statische Prüfvorrichtung

Für die Anbindung des Forschungsprojektes an die bislang vorliegenden Kenntnisse über den Schichtenverbund wurde eine statische Prüfvorrichtung [1] für Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm verwendet. Die Prüfvorrichtung besteht aus einem Rahmen zur Einspannung des Probekörpers und einem Scherrahmen mit vertikaler Führung. Die Aufbringung einer Normalspannung auf den Probekörper ist nicht möglich.

Diese Standard-Prüfvorrichtung wurde durch zwei zusätzliche induktive Wegaufnehmer ergänzt, so dass der Scherweg seitlich an der Prüfvorrichtung gemessen werden kann. Damit wird zusätzlich zum Kolbenweg die Verformung am Probekörper ohne den Einfluss der Systemverformungen der Prüfmaschine erfasst.

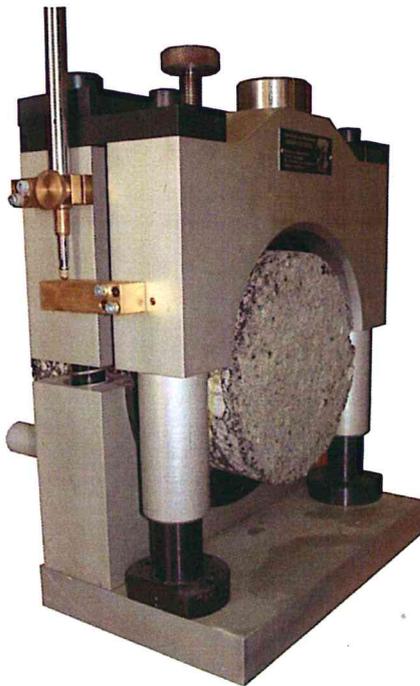


Abbildung 42: Prüfvorrichtung für statische Versuche [1]

7. Probekörperherstellung

7.1. Untersuchte Verbundkombinationen

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden zwei Verbundkombinationen geprüft:

- a) Deckschicht-auf-Binderschicht und
- b) Binderschicht-auf-Tragschicht.

Für die Untersuchungen wurden Asphaltgemische für hochbelastete Straßen festgelegt:

1. Deckschicht: SMA 0/8 S,
2. Binderschicht: ABi 0/16 S und
3. Tragschicht: ATS 0/22 CS.

Jede Verbundkombination wurde:

1. ohne,
2. mit 150 g/m²,
3. mit 250 g/m² und
4. mit 350 g/m² Haftvermittler

hergestellt wobei jeweils zwischen:

- a) unmodifizierte kationische Bitumenemulsion U 60 K und
- b) polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K Art C2.

unterschieden wurde.

Zu Vergleichszwecken wurden zusätzlich zu den Verbundkombinationen aus dem gewählten Mischgut monolithische Platten ohne Schichtengrenzfläche hergestellt. In Tabelle 4 sind die hergestellten Platten aufgelistet.

Platten-Nr.	Verbundkombination	Haftvermittlerart und -menge
1	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	ohne
2	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	150 g/m ² U 60 K
3	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	250 g/m ² U 60 K
4	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	350 g/m ² U 60 K
5	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	150 g/m ² PmOB U 60 K Art C2
6	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	250 g/m ² PmOB U 60 K Art C2
7	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	250 g/m ² PmOB U 60 K Art C2
8	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	350 g/m ² PmOB U 60 K Art C2
11	SMA 0/8 S	monolithisch
12	ABi 0/16 S	monolithisch
13	ATS 0/22 CS	monolithisch
21	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	ohne
22	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	150 g/m ² U 60 K
23	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	250 g/m ² U 60 K
24	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	350 g/m ² U 60 K
25	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	150 g/m ² PmOB U 60 K Art C2
26	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	250 g/m ² PmOB U 60 K Art C2
27	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	250 g/m ² PmOB U 60 K Art C2
28	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	350 g/m ² PmOB U 60 K Art C2

Tabelle 4: Übersicht zu den hergestellten Platten für Probekörpergewinnung

7.2. Herstellung der Platten

Das Mischgut wurde im Labor entsprechend den Eignungsprüfungen im Labor hergestellt. Die Gesteinskörnungen (Granodiorit) und der Eigenfüller wurden aus dem Raum Dresden/Sachsen bezogen. Zur Gewährleistung gleichmäßiger Gesteinskornverteilungen wurden alle Lieferkörnungen mittels Trockensiebung in die in Tabelle 6 aufgeführten einzelnen Fraktionen separiert. Für die Deck- und Binderschicht wurden polymermodifizierte Bitumen PmB 45 A und für die Tragschicht Bitumen 50/70 der

Firma TOTAL Bitumen verwendet. Die Mischgutzusammensetzung der einzelnen Asphalte sind in Tabelle 5 angegeben.

	SMA 0/8 S	ABi 0/16 S	ATS 0/22 CS
Bindemittel	PmB 45 A	PmB 45 A	Bitumen 50/70
Anteile	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
Bitumen	6,9	4,5	4,1
Fasern	0,3	0,0	0,0
Eigenfüller	2,0	3,2	7,0
Dolomitfüller	9,5	3,0	0,0
0,09 / 0,25	4,4	7,2	5,4
0,25 / 0,71	4,7	7,9	8,9
0,71 / 2,00	2,9	4,9	10,5
2,00 / 5,00	16,2	15,2	14,2
5,00 / 8,00	58,8	14,8	16,7
8,00 / 11,20	1,5	16,6	10,8
11,20 / 16,00	0,0	26,2	9,4
16,00 / 22,40	0,0	1,0	13,6
22,40 / 31,50	0,0	0,0	3,5

Tabelle 5: Mischgutzusammensetzung

Das Mischgut für die Platten wurde im Laborzwangsmischer gemischt und mit einem Walzsektorverdichter nach [15] mit dem Braunschweiger Verdichtungsprogramm weg- und kraftgeregelt verdichtet. Es erfolgte die Herstellung von jeweils 4 Platten mit Binder- bzw. Tragschichtmaterial in einer Dicke von 5 cm stets an einem Tag, sowie die Lagerung dieser Platten bis zum darauf folgenden Tag bei Raumtemperatur. Mit Hilfe einer Schaumstoffwalze und einer Waage wurde der Haftvermittler entsprechend der in Tabelle 6 aufgelisteten Menge auf die erste Schicht aufgebracht und bei 20°C bis zum vollständigen Brechen der Emulsion und Verdunsten des Wassers 5 Stunden gelagert. In der Zwischenzeit erfolgte die Herstellung und anschließende Zwischenlagerung im Wärmeschrank des Materials für die obere Schicht. Fünf Stunden nach dem Aufbringen des Haftvermittlers wurde die obere Lage mit einer Dicke von 4 cm beim Deckschicht- bzw. 5 cm beim Binderschichtmaterial aufgebracht und mit dem Walzsektorverdichter verdichtet.

Zeile	Art der Emulsion	Menge Emulsion je m ²	Menge Emulsion je Platte a 32 x 26 cm
1	ohne	0	0
2	U 60 K	150 g/m ²	12,48 g
3	U 60 K	250 g/m ²	20,80 g
4	U 60 K	350 g/m ²	29,12 g
5	PmOB U 60 K Art C2	150 g/m ²	12,48 g
6	PmOB U 60 K Art C2	250 g/m ²	20,80 g
7	PmOB U 60 K Art C2	350 g/m ²	29,12 g

Tabelle 6: Arten und Mengen der verwendeten Emulsionen

7.3. Probekörperherstellung

Aus den Platten wurden entsprechend dem einheitlichen, in Abbildung 43 dargestellten, Schema entweder 2 Bohrkerne \varnothing 100 mm für die dynamischen Versuche und 1 Bohrkern \varnothing 150 mm für den statischen Versuch oder 4 Bohrkerne \varnothing 100 mm gebohrt. Die Bohrkerne werden unabhängig vom verwendeten Bohrschema immer - relativ zu den Plattenecken - an den gleichen Positionen entnommen.

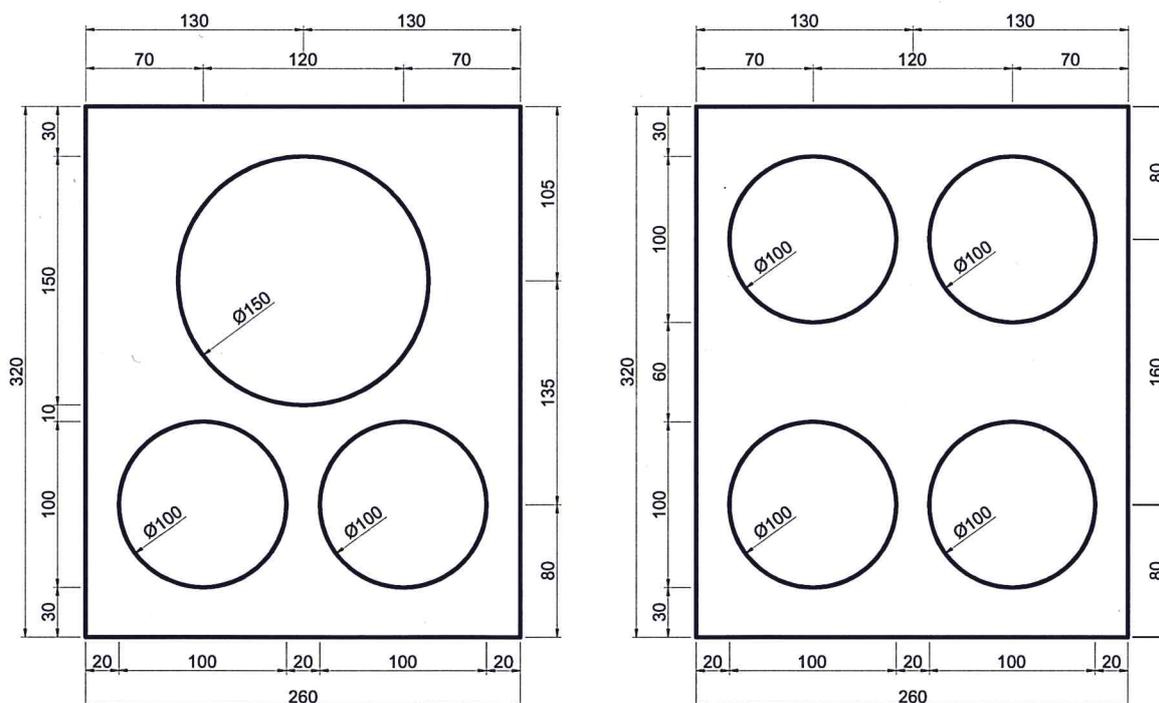


Abbildung 43: Bohrschema für Platten

7.4. Vorbereitung der Probekörper für die dynamische Versuche

Die Probekörper mit einem Durchmesser von ca. 100 mm (bedingt durch den unterschiedlichen Abnutzungsgrad der verwendeten Bohrkrone) wurden mit einem 2-Komponenten-Epoxidharzkleber in einer Probenvorbereitungsvorrichtung (siehe Abbildung 44) in jeweils 4 Stahl-Halbschalen eingeklebt und 1 Woche bei Raumtemperatur zur vollständigen Aushärtung des Klebers gelagert. Vor Versuchsbeginn wurden Prüfvorrichtung und Probekörper 6 Stunden in der Temperierkammer der servohydraulischen Prüfmaschine auf die vorgesehene Prüftemperatur temperiert.



Abbildung 44: Probenvorbereitungsvorrichtung

8. Prüfprogramme und Auswertung der Versuchsergebnisse

8.1. Prüfprogramm für die dynamischen Versuche

Die dynamischen Versuche wurden zur Abdeckung aller Einflussgrößen mit einem umfangreichen Prüfprogramm an einem Probekörper je Verbundkombination durchgeführt. Der Ablauf des Prüfprogramms und die eingestellten Prüfparameter sind in Abbildung 45 dargestellt.

Das Prüfprogramm begann und endete immer mit der Temperatur von -10°C , der Normalkraft von 0 kN und einer Amplitude von 0,005 mm. Der Reihenfolge nach wurde zuerst die Amplitude des Scherweges, und dann die Frequenz geändert. Die

Software der verwendeten Prüfmaschine ermöglichte die Erstellung eines Skriptes, welches die Durchführung der 54 Teilversuche, bestehend aus 9 Amplituden bei nacheinander 6 Frequenzen bei jeweils Aufzeichnung von 25 Lastwechseln, automatisch ablaufen ließ. Unabhängig von der Frequenz wurden je Lastwechsel und Messkanal 50 Messwerte in Anlehnung an die DIN EN 12697-24 [16] aufgezeichnet. Zwischen den Teilversuchen wurde zur Relaxation und Vermeidung von Schädigungen des Probekörpers eine Pause von 30 s eingelegt. Die Durchführung der 51 Teilversuche dauerte 38 Minuten. Anschließend war eine manuelle Änderung der Normalkraft durch Umstellung des Kompressor drucks notwendig. Dieser Vorgang nahm ca. 4 Stunden in Anspruch. Es konnten jeweils 2 Probekörper pro Tag bei einer Temperatur geprüft werden, Nach 4 Stunden erfolgte der Ausbau des ersten Probekörpers und der Einbau des zweiten Probekörpers. Der in der Prüfkammer schon vortemperierte zweite Probekörper musste in der Prüfvorrichtung bedingt durch den Umbau 1 Stunde nachtemperiert werden. Anschließend konnte das beschriebene Prüfprogramm mit dem zweiten Probekörper wiederholt werden. Durch die parallele Prüfung von 2 Probekörpern wurde eine Prüfdauer von 3 Tagen je Probekörper erreicht.

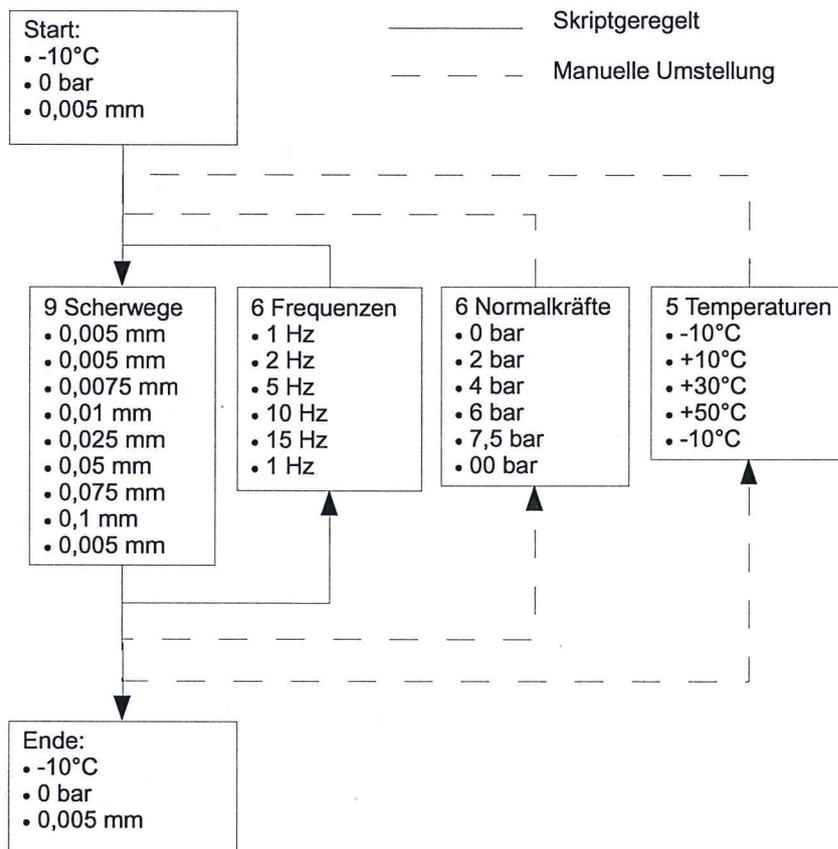


Abbildung 45: Schema des Prüfprogramms

8.2. Auswertung der dynamischen Versuche

Das Ziel der Versuche zum Schichtenverbund ist die Bestimmung von charakteristischen Größen zur Beschreibung des Verbundes zweier Schichten. Die nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft verwendete Grundlage für die Beschreibung bildet GOODMAN's Law [17] nach Gleichung 4:

$$\tau = K_s(\Delta U)$$

Gleichung 4

τ	Scherspannung	[N/mm ²]
K_s	Schermodul	[N/mm ³]
ΔU	horizontale Relativverschiebung	[mm]

Durch Umstellung erhält man die Gleichung 5 für den Schermodul K_s :

$$K_s = \frac{\tau}{\Delta U}$$

Gleichung 5

In der technischen Mechanik wird die Scherspannung τ als Quotient von Scherkraft F und Scherfläche A (Gleichung 6) bezeichnet.

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Gleichung 6

τ	Scherspannung	[N/mm ²]
F	Scherkraft	[N]
A	Scherfläche	[mm ²]

Analog zum HOOK'schen Gesetz wird die Scherspannung als Produkt von Schermodul bzw. Schubmodul G und der Scherung γ nach Gleichung 8 berechnet:

$$\tau = G * \gamma$$

Gleichung 7

τ	Scherspannung	[N/mm ²]
G	Schermodul	[N/mm ²]
γ	Scherung	[-]

Die Scherung γ wird ist definiert als die Längenänderung Δx zur Höhe l nach Gleichung 8:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{l}$$

Gleichung 8

Δx	Längenänderung bzw. Scherweg	[mm]
l	Höhe bzw. Scherbackenabstand	[mm]

Damit kann der Schubmodul G für nach Gleichung 9 berechnet werden:

$$G = \frac{\tau}{\frac{\Delta x}{l}}$$

Gleichung 9

Für einen idealen homogenen isotropen Werkstoff gilt die Beziehung:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

Gleichung 10

E	Elastizitätsmodul	[N/mm ²]
μ	Querdehnzahl	[-]

$$V_F = K_S = \frac{\Delta U}{\tau}$$

Gleichung 11

V_F Verbundfaktor [mm³/N]

Bei den durchgeführten dynamischen Versuchen zum Schichtenverbund wird zunächst der Abstand der Scherbacken von 1 mm bei einem Probekörperdurchmesser von 100 mm als hinreichend klein angenommen, um den Einfluss der zwei 0,5 mm dünnen praktisch existierenden Schichten zwischen der Schichtengrenzfläche und den Scherbackenrändern vernachlässigen zu können.

Für die Bestimmung der Parameter für die Gleichungen wurde der Scherweg ΔU als Differenz der aufgezeichneten vertikalen Wege des vertikal beweglichen Teils der Prüfvorrichtung abzüglich des horizontal beweglichen Teils berechnet. Die Scherkraft entspricht der aufgezeichneten, mit der Kraftmessdose gemessenen, Kraft. Damit ergibt sich die Scherspannung aus dem Quotienten von Scherkraft und Scherfläche nach Gleichung 12:

$$\tau = \frac{F}{A_S} = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

Gleichung 12

A_S Querschnittsfläche des Probekörpers [mm²]

d Probekörperdurchmesser [mm]

Für die Auswertung der Versuche wurden die Messwerte aller Lastwechsel herangezogen und jeweils für einen Versuch der Mittelwert für Scherweg und Scherspannung aus den Messwerten der induktiven Wegaufnehmer und der Kraftmessdose berechnet.

Die in Abbildung 47 dargestellten aufgezeichneten Messwerte für eine Amplitude (Kolbenweg) von 0,01 mm beinhalten das Rauschen der Messkanäle. Die einfache Ermittlung der Minimum- und Maximumwerte für jeden Messkanal würde zu Abweichungen von mehr als 10 % gegenüber dem tatsächlichen Messwert führen. Daher wurde eine Regression über die Sinusfunktion nach Gleichung 13 durchgeführt.

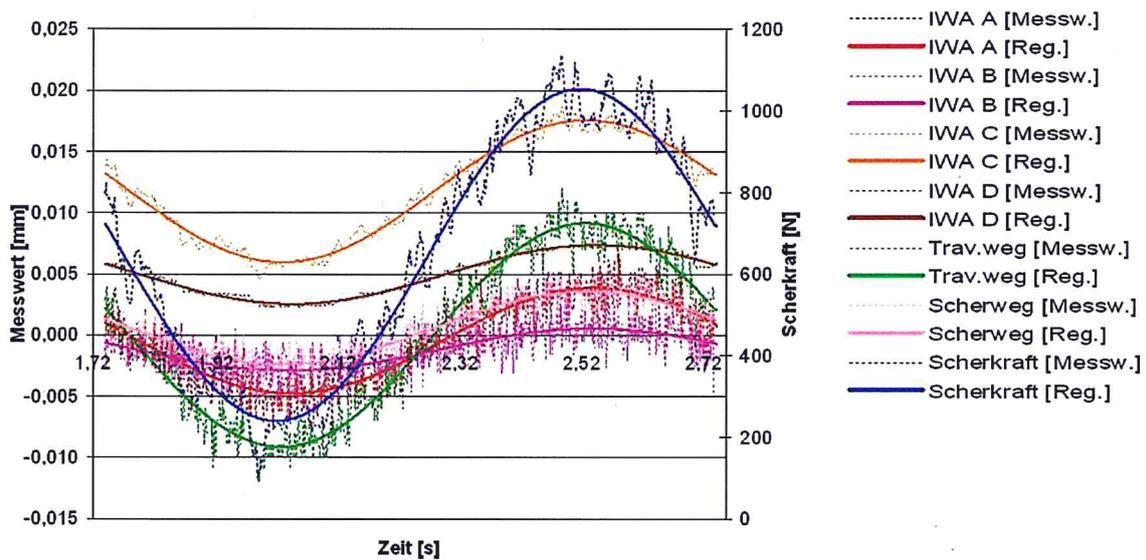


Abbildung 47: Darstellung der Scherwege bzw. Scherkräfte in Abhängigkeit von der Zeit als Ergebnis der Regression für einen Lastwechsel mit einer Amplitude (Kolbenweg) von 0,01 mm

$$y(t) = A + B * \sin(2\pi ft + C)$$

Gleichung 13

- A Amplitude
- B Absolutanteil
- C Phasenverschiebung

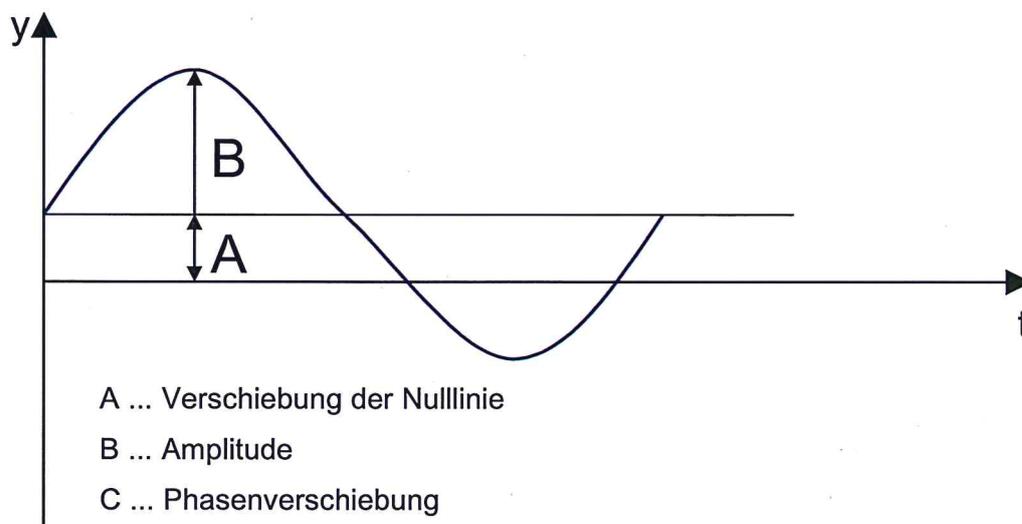


Abbildung 48: Parameterdarstellung für Gleichung 13

Diese drei Parameter wurden mit Hilfe der von HAARIG [18] aufgestellten Regressionsformeln für die Sinusfunktion, getrennt für jeden Messkanal, bestimmt.

$$A = \beta_0 \quad \text{Gleichung 14}$$

$$B = \sqrt{\beta_1 + \beta_2} \quad \text{Gleichung 15}$$

$$C = \tan^{-1} \frac{\beta_2}{\beta_1} + \begin{cases} 0, \text{ falls } \beta_1 > 0 \\ \pi, \text{ falls } \beta_1 < 0 \text{ und } \beta_2 \geq 0 \\ -\pi, \text{ falls } \beta_1 < 0 \text{ und } \beta_2 < 0 \end{cases} \quad \text{Gleichung 16}$$

mit den Regressionskoeffizienten:

$$\beta_0 = \frac{\sum y_i}{n} - \beta_1 \frac{\sum \sin \omega_i}{n} - \beta_2 \frac{\sum \cos \omega_i}{n} \quad \text{Gleichung 17}$$

$$\beta_1 = \frac{(n \sum \sin \omega_i \cdot y_i - \sum y_i \sum \sin \omega_i) \cdot (n \sum (\cos \omega_i)^2 - \sum \cos \omega_i \sum \cos \omega_i) - (n \sum \cos \omega_i \cdot y_i - \sum y_i \sum \cos \omega_i) \cdot (n \sum \sin \omega_i \cos \omega_i - \sum \cos \omega_i \sum \sin \omega_i)}{(n \sum (\sin \omega_i)^2 - \sum \sin \omega_i \sum \sin \omega_i) \cdot (n \sum (\cos \omega_i)^2 - \sum \cos \omega_i \sum \cos \omega_i) - (n \sum \sin \omega_i \cos \omega_i - \sum \sin \omega_i \sum \cos \omega_i) \cdot (n \sum \sin \omega_i \cos \omega_i - \sum \cos \omega_i \sum \sin \omega_i)}$$

Gleichung 18

$$\beta_2 = \frac{(n \sum (\sin \omega_i)^2 - \sum \sin \omega_i \sum \sin \omega_i) \cdot (n \sum \cos \omega_i \cdot y_i - \sum y_i \sum \cos \omega_i) - (n \sum \sin \omega_i \cos \omega_i - \sum \sin \omega_i \sum \cos \omega_i) \cdot (n \sum \sin \omega_i \cdot y_i - \sum y_i \sum \sin \omega_i)}{(n \sum (\sin \omega_i)^2 - \sum \sin \omega_i \sum \sin \omega_i) \cdot (n \sum (\cos \omega_i)^2 - \sum \cos \omega_i \sum \cos \omega_i) - (n \sum \sin \omega_i \cos \omega_i - \sum \sin \omega_i \sum \cos \omega_i) \cdot (n \sum \sin \omega_i \cos \omega_i - \sum \cos \omega_i \sum \sin \omega_i)}$$

Gleichung 19

8.3. Prüfprogramm für die statische Prüfvorrichtung

Die Probekörper mit Durchmesser 150 mm wurden in der Temperierkammer der ser-vohydraulischen Prüfmaschine über 12 Stunden im Luftbad auf die Prüftemperatur von 20°C temperiert. Nach dem Einlegen und Ausrichten des Bohrkerns in der Ab-

schervorrichtung wurde die Bohrkerne mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min abgeschert. Dabei erfolgte die kontinuierliche Aufzeichnung von Kraft und Kolbenweg sowie des Scherweges mit zwei seitlich an der Prüfvorrichtung angebrachten induktiven Wegaufnehmern.

8.4. Auswertung der statischen Versuche

Anhand des Kraft-Weg-Diagramms, entsprechend Abbildung 49, wurden die maximale Scherkraft sowie die zwei Scherwege als Tangente am linearen Bereich der Kraft-Weg-Kurve für jeden Versuch bestimmt.

Aufgrund der Abnutzung der verwendeten Bohrkronen traten Differenzen bei den Durchmessern der Bohrkerne auf. Deswegen wurden die Scherkräfte mit einem Korrekturfaktor nach Gleichung 20 auf einen Bohrkerndurchmesser von 150 mm umgerechnet.

$$K^{BK} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

Gleichung 20

K^{BK}	Korrekturfaktor	[-]
d_1, d_2	Bohrkerndurchmesser	[mm]

Die bei den Versuchsergebnissen angegebenen Verbundfaktoren V_F sollen das Verhältnis von Scherweg zu Scherspannung darstellen und nur zum Vergleich mit den dynamischen Versuchen herangezogen werden.

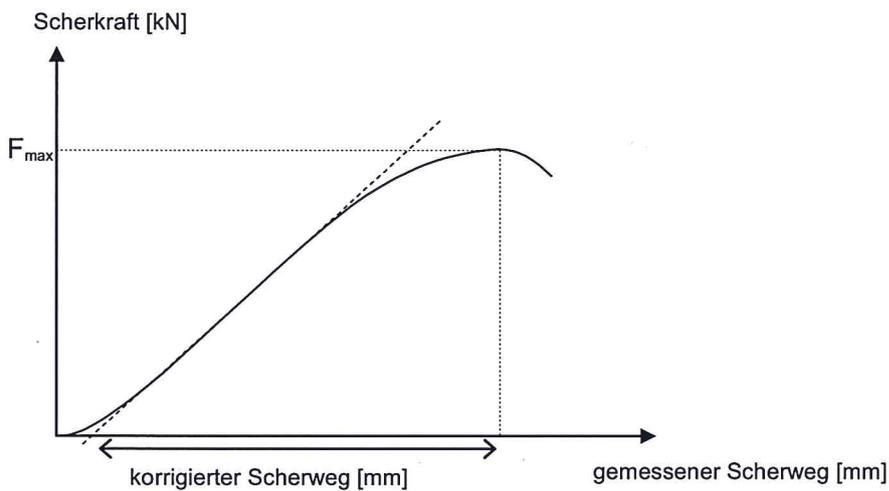


Abbildung 49: Scherkraft-Scherweg-Diagramm für statischen Scherversuch nach LEUTNER (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 1999)

9. Versuchsergebnisse

9.1. Ergebnisse der dynamischen Versuche

Die umfangreichen Ergebnisse der dynamischen Versuche an 17 Probekörpern werden zunächst in Form von allgemeinen Funktionen am Beispiel des Probekörpers PK 24B dargestellt. Anschließend werden die Probekörper mit unterschiedlichen Verbundkombinationen anhand ausgewählter charakteristischer Werte miteinander verglichen.

9.1.1. Abhängigkeit der Messgrößen von der Lastwechselzahl

In Abbildung 50 sind die gemessenen Scherkräfte in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl für die Amplitude des Kolbenweges von 0,1 mm, die Normalspannung 0 N/mm², Frequenz 1 Hz und 4 Temperaturen (-10°C/10°C/30°C/50°C) im Diagramm aufgetragen.

Bei annähernd konstantem Scherweg ist bei allen Temperaturen während der 25 Lastwechsel eine geringe Abnahme der gemessenen Scherkraft aufgetreten. Bei der Prüftemperatur -10°C wurden Amplituden der Scherkraft von ca. 3750 N und bei +50°C Amplituden von nur ca. 260 N aufgezeichnet.

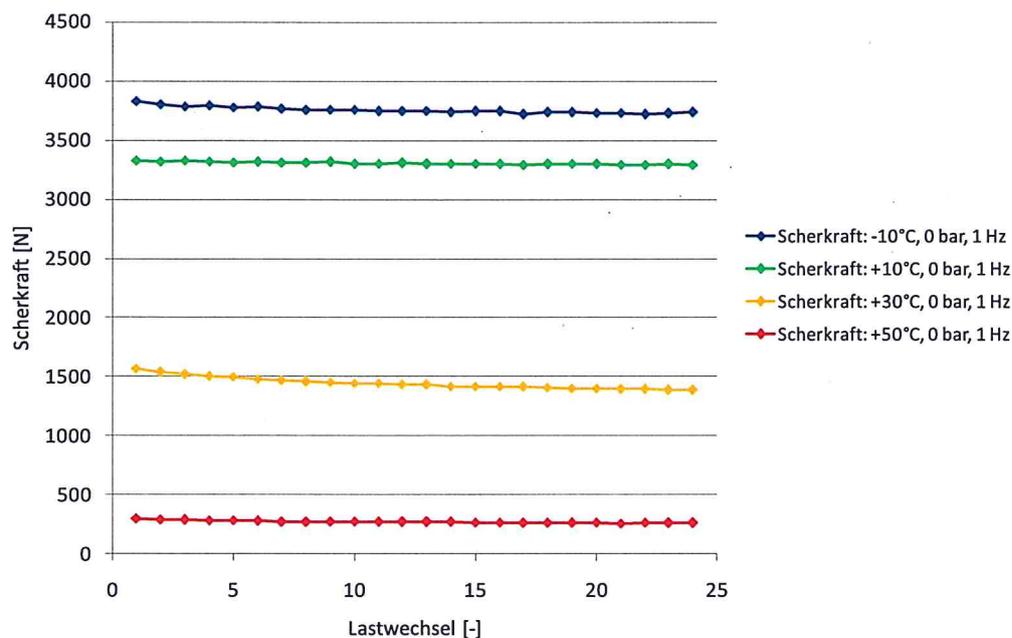


Abbildung 50: PK 2B (SMA 0/8 S – ABi 0/16 S, 150 g/m² U 60 K): Diagramm Lastwechsel - gemessene Scherkraft bei 1 Hz und 0 N/mm² Normalspannung

Das umgekehrte Bild ergibt sich bei den, in Abbildung 51 dargestellten, gemessenen Scherwegen. Bedingt durch die sehr viel größere Steifigkeit des Probekörpers bei der Prüftemperatur -10°C gegenüber der Steifigkeit bei +50°C sind die geringeren an der Prüfvorrichtung gemessenen Scherwege auf die Verformungen der Prüfmaschine zurückzuführen. Alternativ könnte bei tiefen Temperaturen und einer Prüfmaschinenregelung über die Wegaufnehmer an der Prüfvorrichtung eine geringere Amplitude des Soll-Scherweges vorgegeben werden, um eine Schädigung des Probekörpers zu vermeiden bzw. zu verringern.

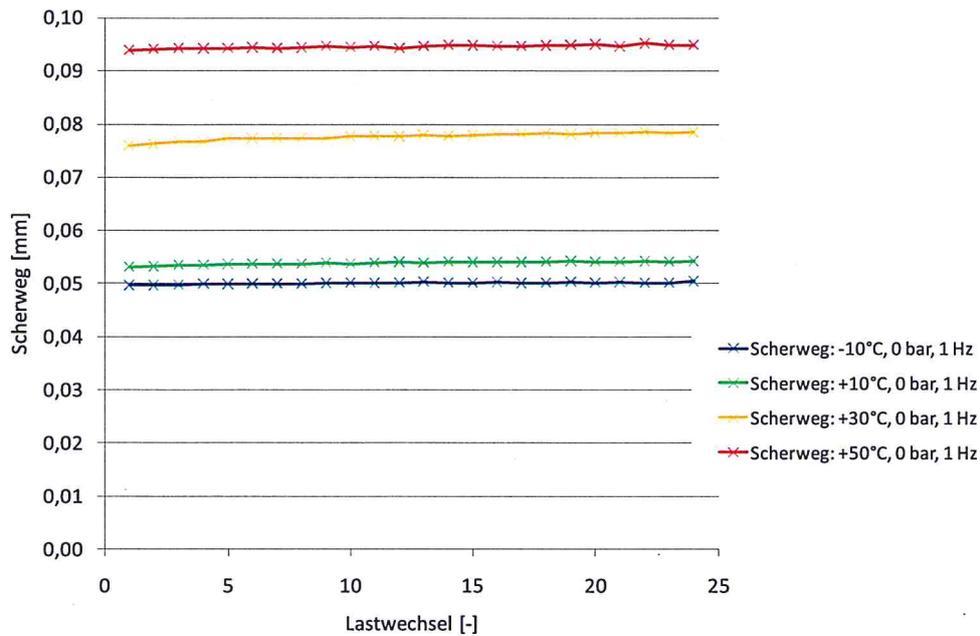


Abbildung 51: PK 2B (SMA 0/8 S – ABi 0/16 S, 150 g/m² U 60 K): Diagramm Lastwechsel - gemessener Scherweg bei 1 Hz und 0 N/mm² Normalspannung

Die in Abbildung 52 dargestellten Funktionen für den Verbundfaktor V_F wurden nach Gleichung 4 berechnet. Die niedrige gemessene Scherkraft für den Graphen von +50°C ergibt einen viel größeren Verbundfaktor im Vergleich zu den Werten bei einer Prüftemperatur von -10°C.

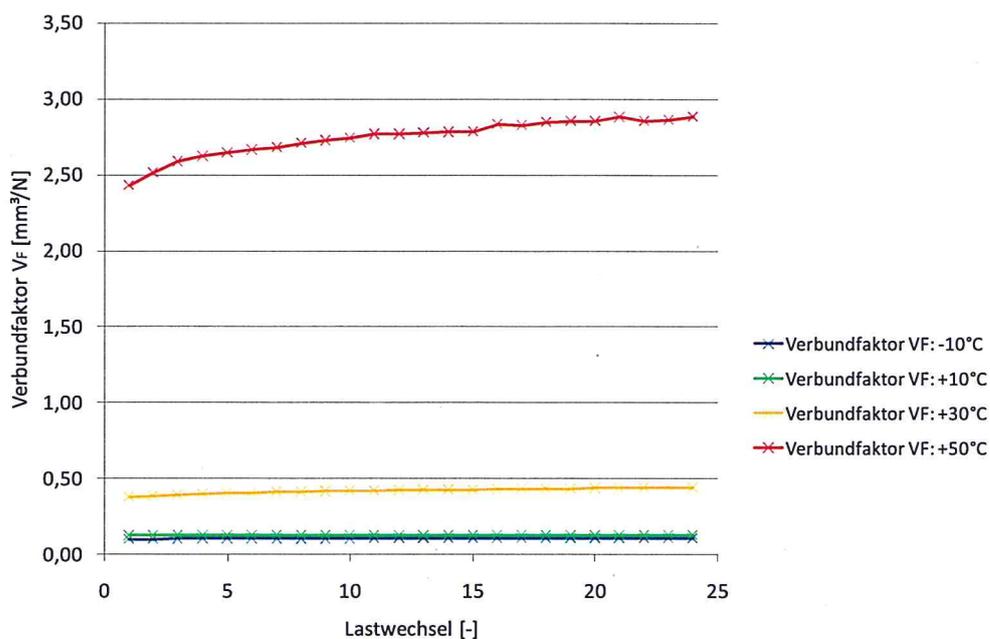


Abbildung 52: PK 2B (SMA 0/8 S – ABi 0/16 S, 150 g/m^2 U 60 K): Diagramm Lastwechsel – Verbundfaktor V_F bei 1 Hz und 0 N/mm^2 Normalspannung

9.1.2. Abhängigkeit der gemessenen Scherspannung vom Scherweg

Die in Abbildung 53 dargestellten Abhängigkeiten der ermittelten Scherspannungen in Abhängigkeit von den Scherwegen weisen einen stetigen und gering degressiven Verlauf auf. Die Normalkraft hat bei einer Prüftemperatur von -10°C nur einen geringen Einfluss. Die Werte für die Normalkraft von 0 N/mm^2 , mit der begonnen wurde, liegt fast identisch auf den Werten von 00 N/mm^2 , mit der die Versuchsreihe wiederholt wurde. Das gleiche gilt auch für die in Abbildung 54 dargestellten Zusammenhänge bei $+10^\circ\text{C}$, jedoch sind die gemessenen Scherspannungen etwas geringer.

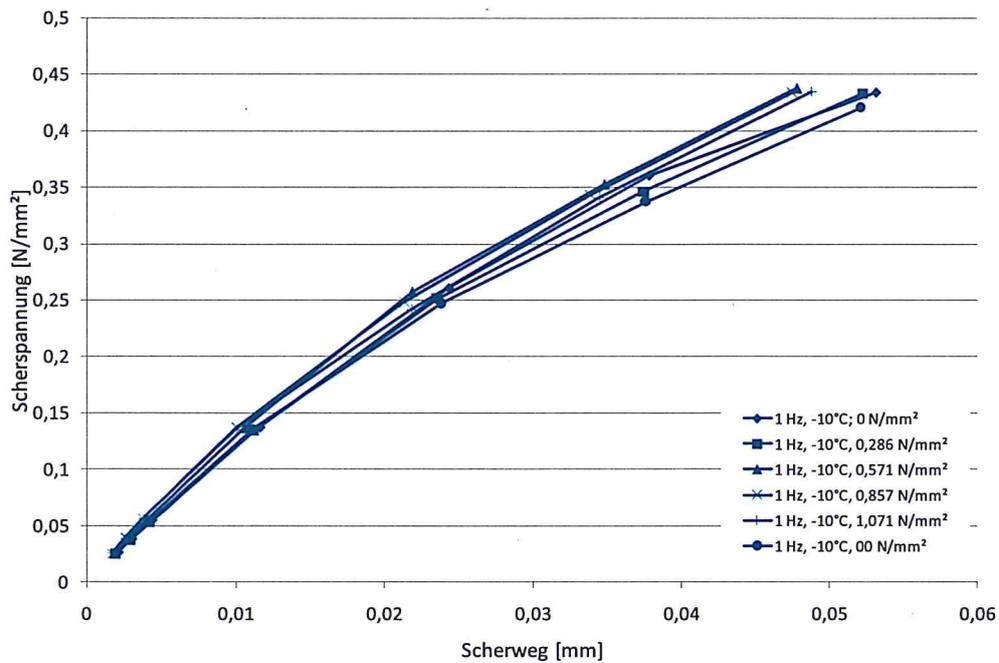


Abbildung 53: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):

Diagramm Scherweg – Scherspannung bei -10°C

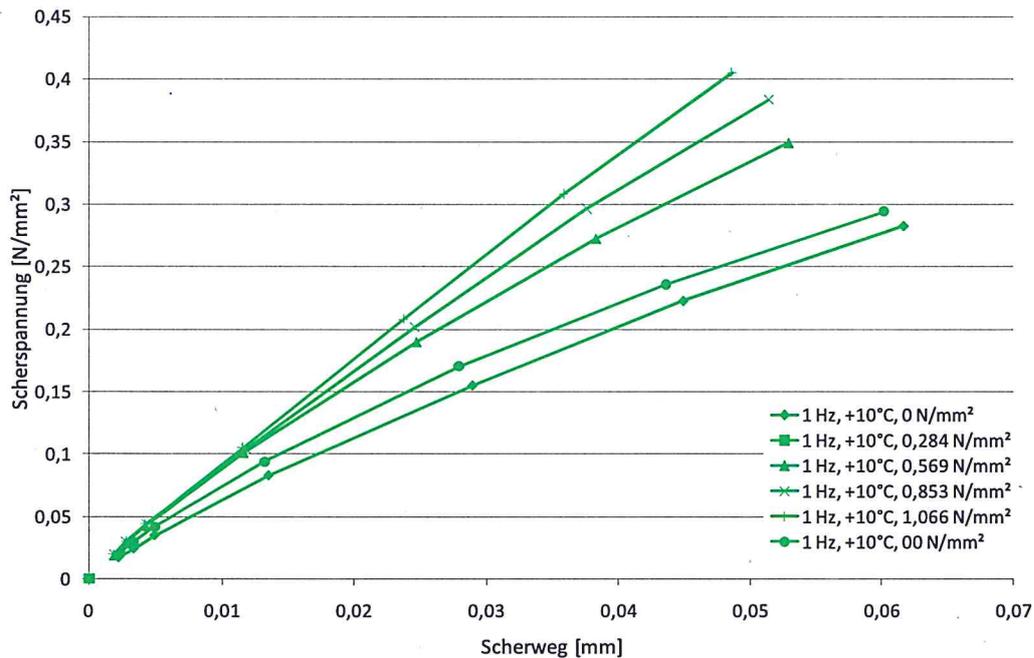


Abbildung 54: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):

Diagramm Scherweg – Scherspannung bei +10°C

Bei der Prüftemperatur von 30°C ist insgesamt eine geringere Scherspannung bei etwas größeren Scherwegen gegenüber den Werten bei einer Temperatur von 10°C festzustellen. Dies macht sich bei niedrigen Normalspannungen deutlicher bemerkbar, als bei großen Normalspannungen. In gleicher Weise gilt dies auch für die Ergebnisse der Versuche bei Prüftemperatur von 50°C. Bei dieser Temperatur wird ohne Normalspannung nur noch eine sehr geringe Scherspannung gemessen. Die Erhöhung der Normalspannung hat im Vergleich zu geringeren Prüftemperaturen einen viel größeren Anstieg der Scherspannung zur Folge.

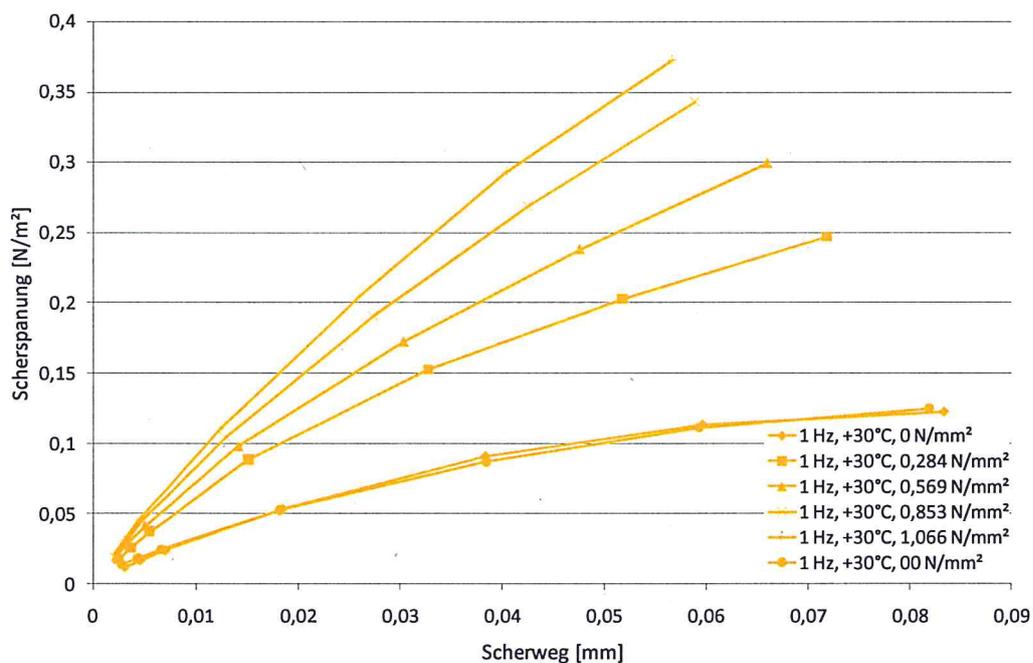


Abbildung 55: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):
Diagramm Scherweg – Scherspannung bei +30°C

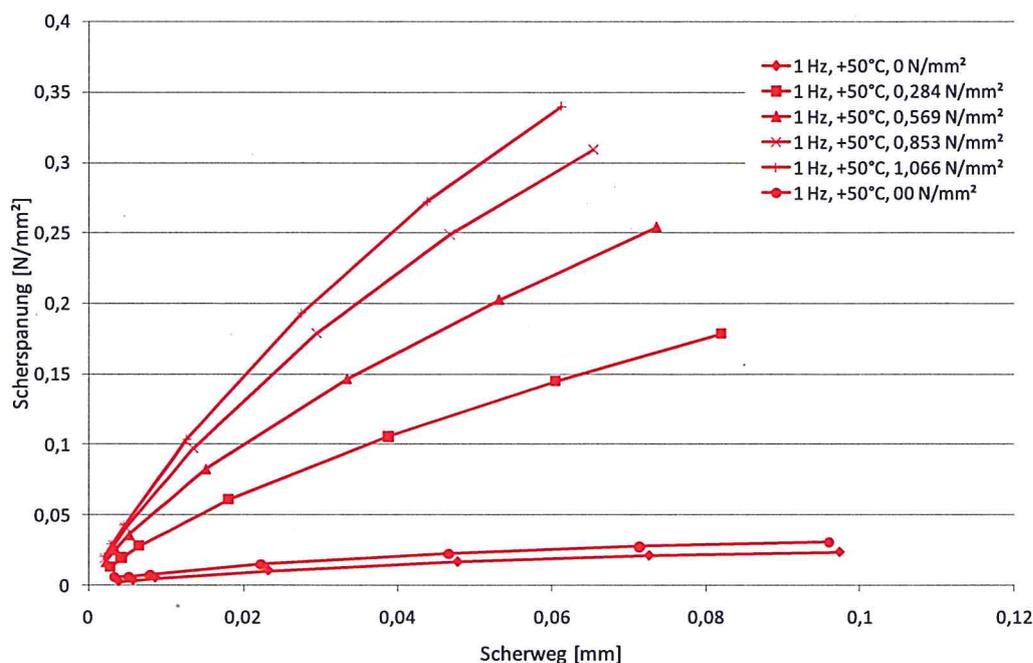


Abbildung 56: PK 24B (Abi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):

Diagramm Scherweg – Scherspannung bei +50°C

Zur Kontrolle der Beeinflussung des Probekörpers durch die Vielzahl an Versuchen bzw. Lastwechseln bei unterschiedlichen Belastungen und Temperaturen wurden die ersten Versuche mit einer Prüftemperatur von -10°C am Ende der Versuchsreihen bei der gleichen Temperatur (in der Abbildung 57 dargestellt als „-010°C“) wiederholt. Trotz der geringeren, an der Prüfvorrichtung gemessenen, Scherwege hat die Scherspannung gegenüber den Versuchen zu Beginn sogar etwas zugenommen. Der Unterschied zwischen den ersten und letzten Versuchen an den identischen Probekörpern wird bei der Darstellung der Verbundfaktoren V_F in Abhängigkeit von den Scherwegen in Abbildung 59 deutlicher sichtbar. Die gesamte Bandbreite der Scherspannungen und Scherwege bei 1 Hz ist in Abbildung 58 zusammengefasst. Während der Einfluss der Normalspannung bei tiefen Temperaturen gering ist, ist die Bandbreite bei hohen Prüftemperaturen zwischen geringer Normalspannung und ebenso geringer Scherspannung sowie hoher Normalspannung und hoher Scherspannung relativ groß. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf die Wirkung von Verklebung und Verzahnung/Reibung in Abhängigkeit von der Temperatur. Während bei tiefen Temperaturen die Verklebung durch das Bindemittel Bitumen der dominante Einflussfaktor ist, tritt bei hohen Temperaturen und damit verbundener

geringer Wirkung des Bindemittels Bitumen der Einfluss von Reibung und Verzahnung an der Schichtengrenzfläche in den Vordergrund.

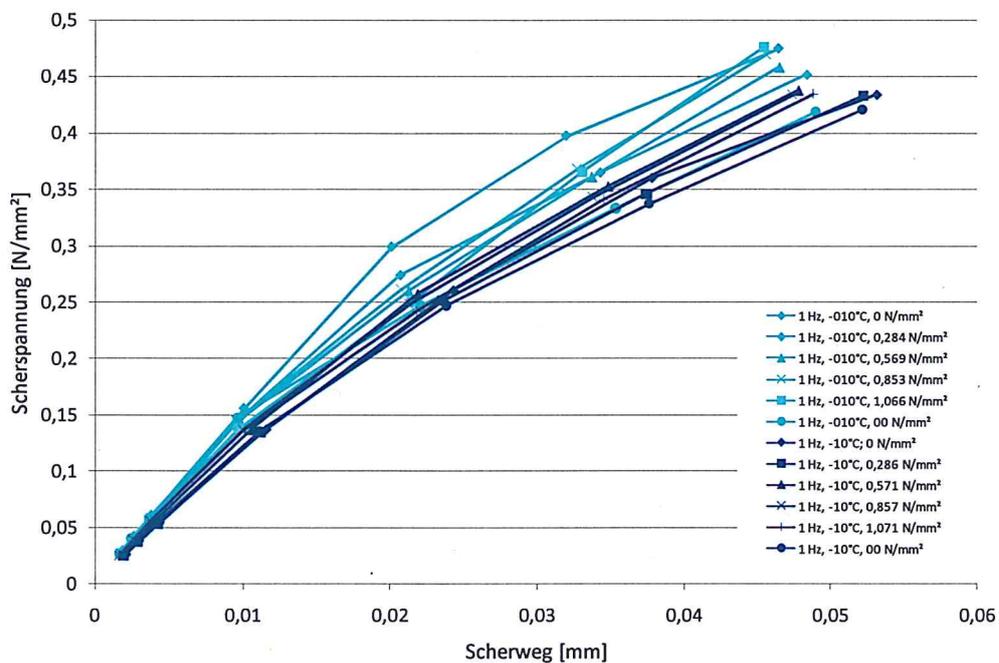


Abbildung 57: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m^2 U 60 K):
Diagramm Scherweg – Scherspannung bei -10°C und -010°C

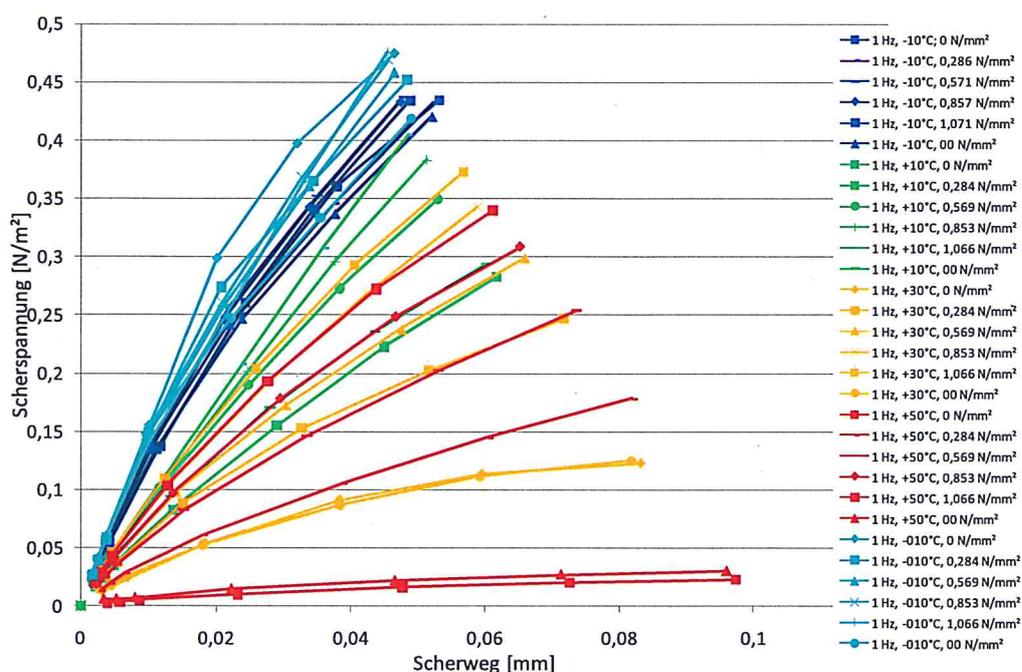


Abbildung 58: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):

Diagramm Scherweg – Scherspannung bei -10/10/30/50/-010°C

9.2. Abhängigkeit des Verbundfaktors von den Einflussgrößen

Der Verbundfaktor wird an dieser Stelle zur Vereinfachung der Darstellung und als Größenmaß für den Verbund der Asphaltsschichten verwendet.

In Abbildung 59 sind für die Prüftemperatur von -10°C (bzw. -010°C zum Vergleich als Wiederholung) und die Frequenz von 1 Hz die Verbundfaktoren in Abhängigkeit vom Scherweg für unterschiedliche Normalspannungen dargestellt. Im Vergleich zu den in Abbildung 60 aufgetragenen Ergebnissen für die Prüftemperatur von 50°C ist der Einfluss der Normalspannung auf den Verbundfaktor bei -10°C sehr gering. Bei beiden Temperaturen wird bei zunehmender Normalspannung der Verbundfaktor geringer. Dies entspricht einer besseren Übertragung von Scherspannungen über die Schichtengrenzfläche in die zweite Schicht mit zunehmender Normalspannung.

Der Einfluss der Vielzahl von Versuchen, d. h. Belastungswiederholungen je Probekörper, auf den Verbundfaktor ist durch den Vergleich der Graphen in den Abbildungen über die Werte der Normalspannung „00 N/mm²“ möglich, die den am Anfang der Versuchsreihen aufgezeichneten Werten mit einer Normalspannung von 0 N/mm²

entsprechen. Bei -10°C sind die Graphen der Ergebnisse dieser beiden Versuche nahezu übereinander, während mit zunehmender Temperatur, insbesondere bei 50°C , die Verbundfaktoren infolge der wiederholten Belastungen bei den verschiedenen Versuchen an dem jeweiligen Probekörper deutlich zunehmen. Das bedeutet, dass sich die Verbundwirkung mit wiederholter Belastung deutlich verbessern kann.

Das gesamte Spektrum der Verbundfaktoren für alle Temperaturen und Normalspannungen ist in Abbildung 61 dargestellt.

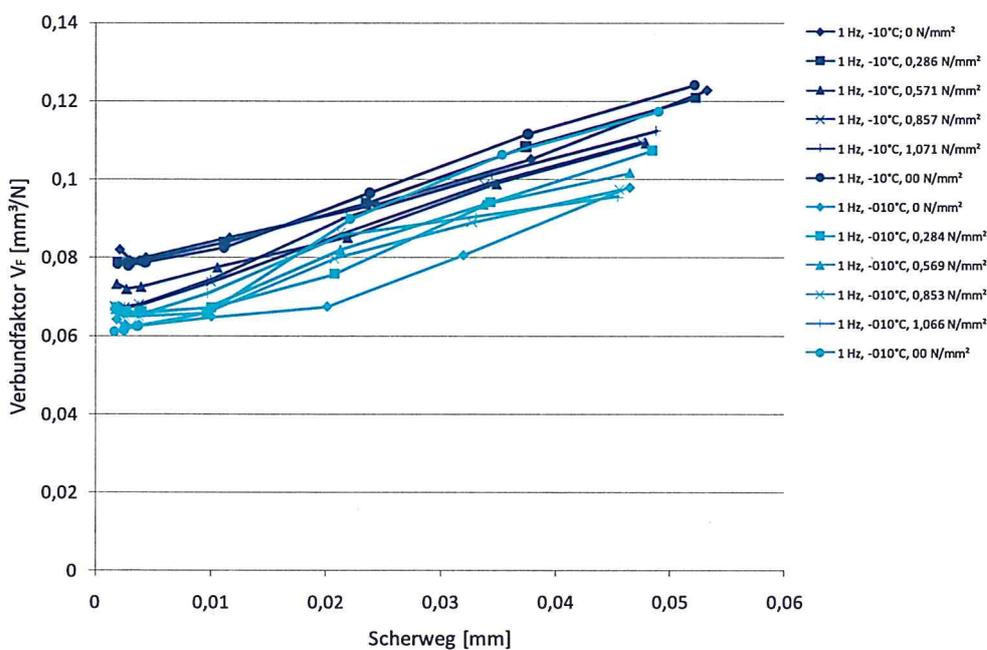


Abbildung 59: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, $350 \text{ g}/\text{m}^2$ U 60 K):

Diagramm Scherweg - Verbundfaktor für -10°C

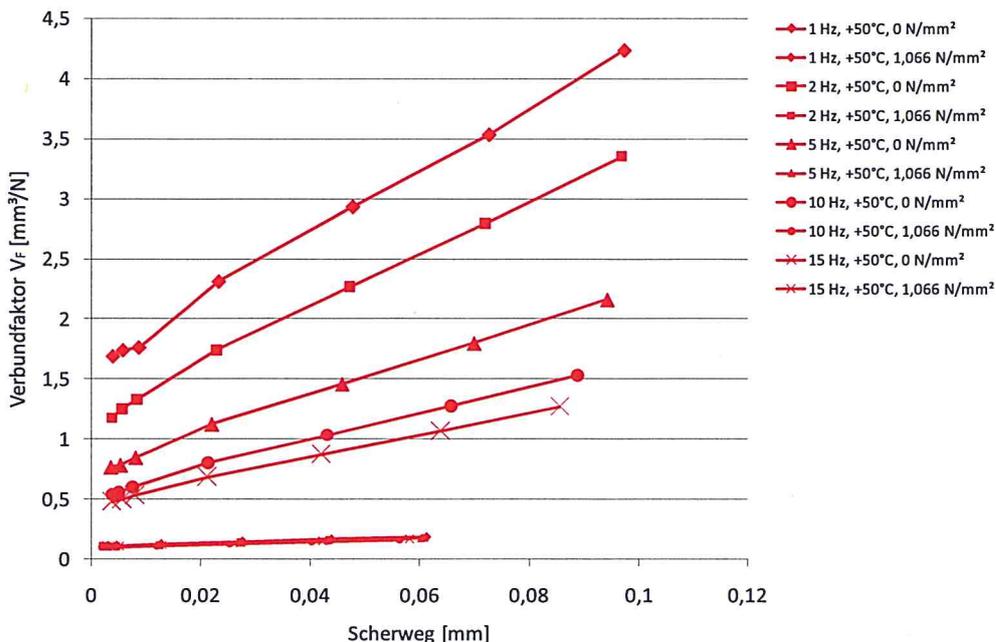


Abbildung 60: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):
Diagramm Scherweg - Verbundfaktor für +50°C

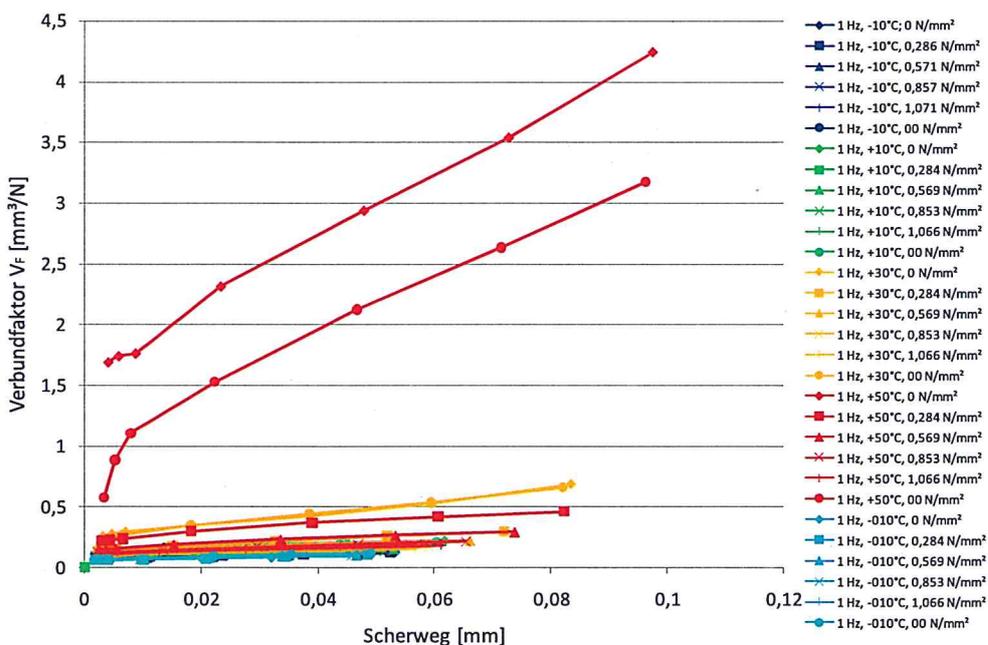
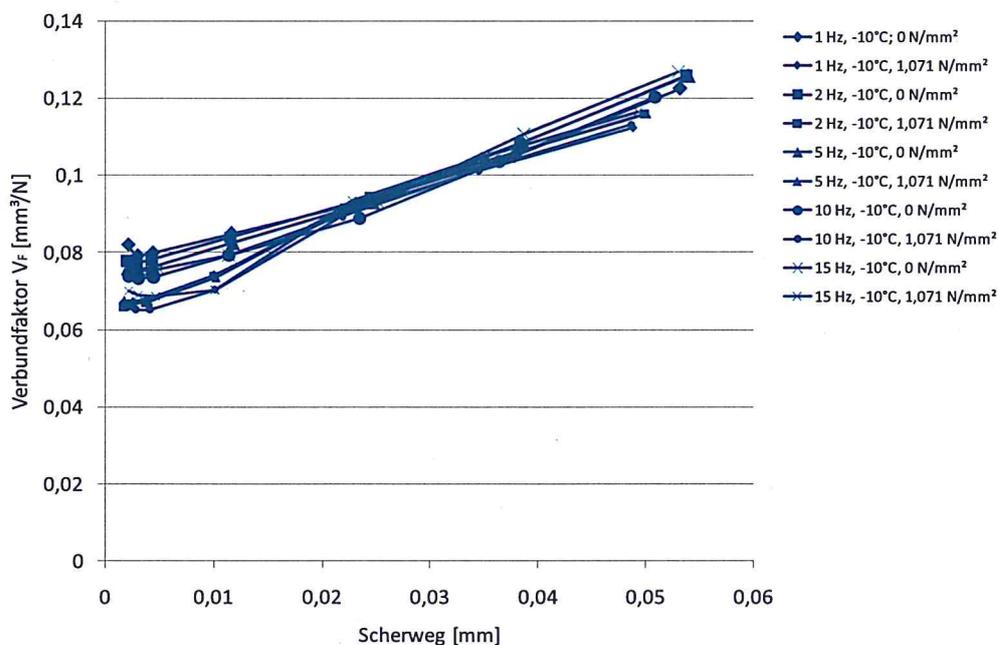
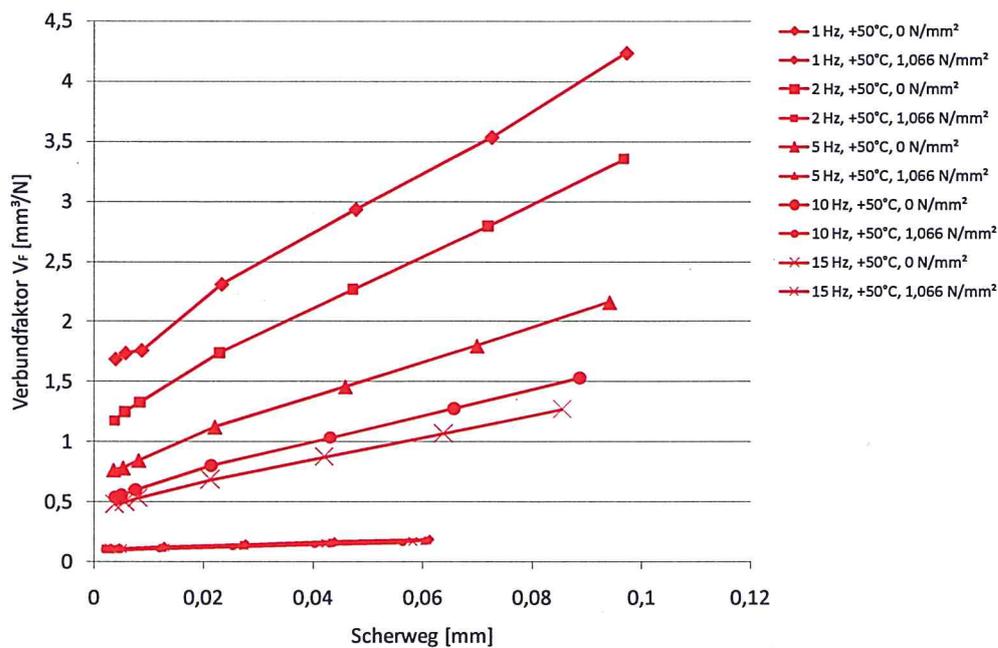


Abbildung 61: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):
Diagramm Scherweg - Verbundfaktor für -10°C bis +50°C

In Abbildung 62 sind Ergebnisse der Versuche bei den Frequenzen 1 Hz bis 15 Hz für die Prüftemperatur von -10°C aufgetragen. Bei dieser Temperatur ist der Einfluss der Prüffrequenz ebenso wie der der Normalspannung auf den Verbundfaktor nicht zu erkennen. Dagegen hat die Prüffrequenz bei einer Temperatur von 50°C einen nicht mehr vernachlässigbaren Einfluss. Mit zunehmender Frequenz wird der Verbundfaktor erwartungsgemäß geringer (Abbildung 63), die Verbundwirkung wird also besser. Hier tritt der Einfluss des Bindemittels deutlich hervor. Im Vergleich zur Auswirkung der Frequenz hat jedoch die Normalkraft den wesentlich größeren Einfluss auf den Verbundfaktor.



**Abbildung 62: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):
Diagramm Scherweg - Verbundfaktor für alle Frequenzen bei -10°C**



**Abbildung 63: PK 24B (ABi 0/16 S – ATS 0722 CS, 350 g/m² U 60 K):
Diagramm Scherweg - Verbundfaktor für alle Frequenzen bei 50°C**

9.2.1. Vergleich der geprüften Verbundkombinationen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden je 7 Verbundkombinationen mit Deck-
schicht-auf-Binderschicht und Binderschicht-auf-Tragschicht-Material sowie je 1 mo-
nolithischer Probekörper dieser 3 Asphaltgemische geprüft. Anhand charakteristi-
scher Werte werden die Versuchsergebnisse in den folgenden sechs Diagrammen
gegenübergestellt.

Die Versuchsergebnisse sind als Verbundfaktoren V_F in den Diagrammen und in An-
lage 3 in tabellarischer Form jeweils bei:

- Prüffrequenz 1 Hz,
- Normalspannung 0 / 0,28 / 0,57 / 0,85 / 1,07 / 00 N/m² und
- Prüftemperatur -10 / 10 / 30 / 50 / -010 °C

angegeben.

Beim Vergleich der Versuchsergebnisse kann keine einheitliche Tendenz zwischen
den Verbundkombinationen festgestellt werden. Die Verbundfaktoren haben meis-

tens innerhalb einer Prüftemperatur einheitliche Reihenfolgen bei verschiedenen Normalspannungen. Einzelne Werte (z. B. die in Abbildung 64 dargestellten Verbundkombination PmoB U 60 K mit 150 g/m² bei Prüftemperatur 30°C / 50°C und 0,28 N/mm² sowie bei -010°C und 0 N/mm²) zeigen offensichtliche Abweichungen im Vergleich zu anderen Normalspannungen. Die Ursache dieser Abweichungen konnte bislang noch nicht geklärt werden.

Die größten Verbundfaktoren V_F sind bei fehlender Normalspannung bei einer Prüftemperatur von 50°C aufgetreten. Dieses Ergebnis wurde erwartet und entspricht den allgemeinen Kenntnissen über die geringe Steifigkeit des Bindemittels bei dieser hohen Prüftemperatur und der fehlenden Normalspannung zur Aktivierung von Reibung und Verzahnung in der Schichtengrenzfläche. In Straßenbefestigungen tritt im Bereich der höchsten Beanspruchung des Verbundes zwischen den Asphaltsschichten immer eine von mindestens 0,28 N/mm² auf. Zur besseren Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse bei vorhandener Normalspannung wurden deswegen alle Verbundkombinationen in Diagrammen ohne Einbeziehung der hohen Verbundfaktoren dargestellt.

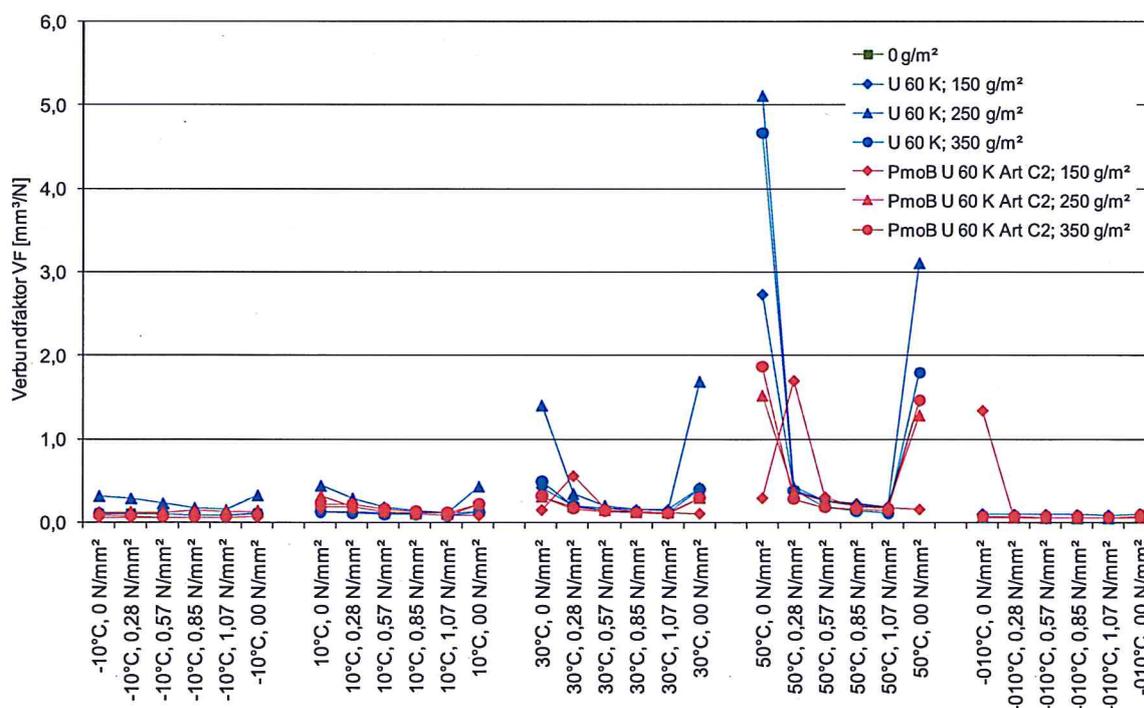


Abbildung 64: Vergleich der Ergebnisse der Verbundkombination Deckschicht-auf-Binderschicht

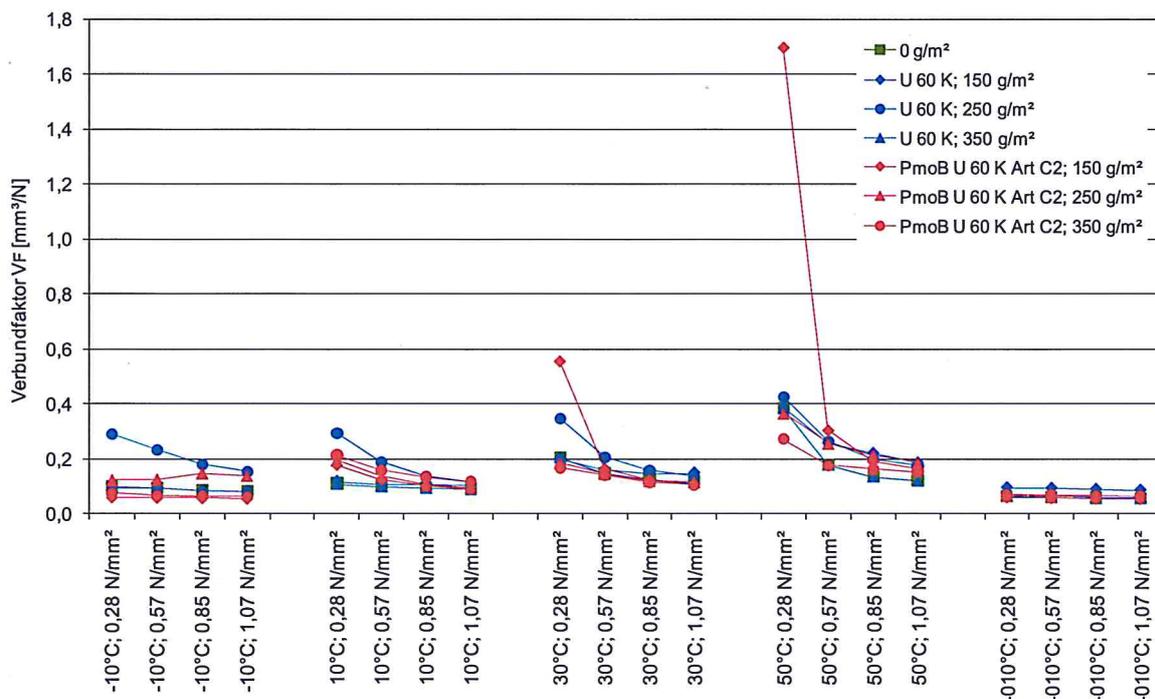


Abbildung 65: Vergleich der Ergebnisse der Verbundkombination Deckschicht-auf-Binderschicht, reduziert auf Normalspannungen > 0,28 N/mm²

Beim Vergleich der Verbundkombinationen für die Variante Deckschicht-auf-Binderschicht in Abbildung 65 ist keine einheitliche Tendenz bei Auswirkung der Menge und Art an verwendetem Haftvermittler auf den Verbund der Schichten festzustellen. Es ist jedoch, wie auch bei der Variante Binderschicht-auf-Tragschicht, eindeutig festzustellen, dass die Vielzahl an durchgeführten Versuchen (1620 je PK mit jeweils 25 Lastwechseln) zu keiner Schädigung des Probekörpers, sondern eher zu einer Verbesserung des Schichtenverbundes geführt hat. Bei der Wiederholung der ersten Prüftemperatur von -10°C am Ende der Versuchsreihen (im Diagramm als -010°C gekennzeichnet) wurden bis auf eine Ausnahme immer geringere Verbundfaktoren ermittelt.

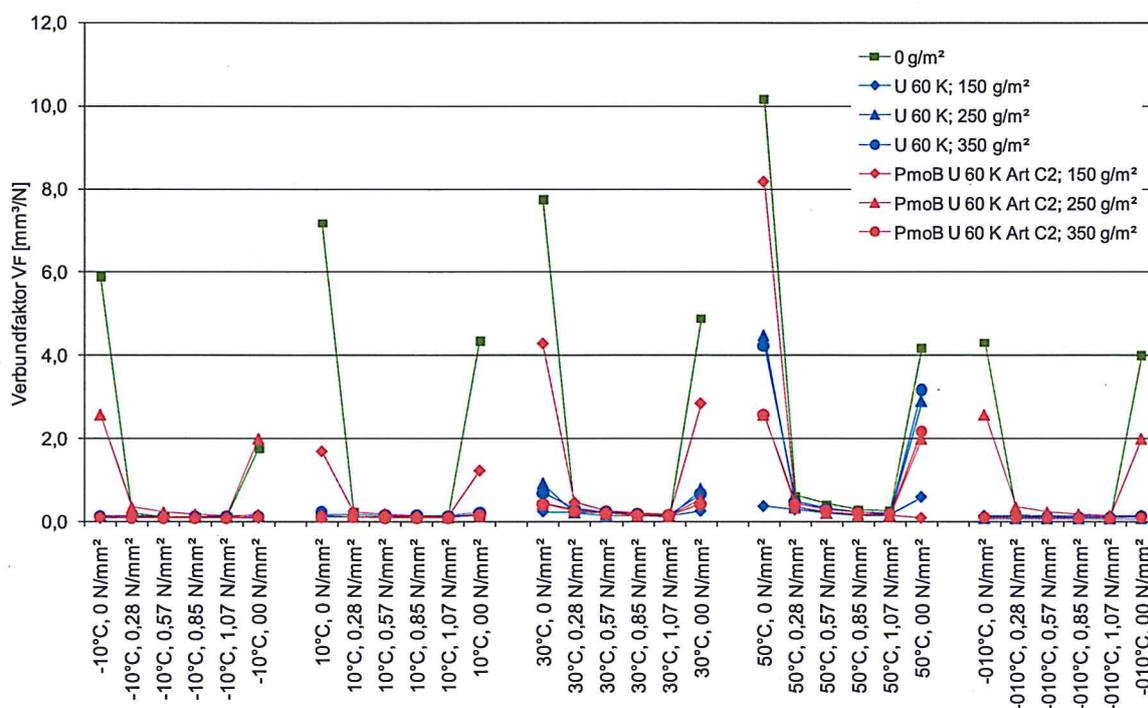


Abbildung 66: Vergleich der Ergebnisse der Verbundkombination Binderschicht-auf-Tragschicht

Bei der Durchführung der Versuche zur Variante Binderschicht-auf-Tragschicht ohne Haftvermittler ist der Probekörper bereits bei der ersten Versuchsreihe bei -10°C und ohne Normalspannung in der Schichtengrenzfläche gebrochen. An den Grenzflächen der zwei Schichten war nur ein geringer Bindemittelfilm erkennbar. Außerdem waren bereits deutliche Spuren und Abrieb von den Scherbewegungen sichtbar. Der gebrochene Probekörper PK 21 wurde daraufhin noch einmal eingebaut und mit dem vollständigen Versuchsprogramm geprüft. Nach der Prüftemperatur von 50°C waren die zwei Schichten des Probekörpers von Hand nicht mehr trennbar. In Abbildung 66 ist jedoch gut ersichtlich, dass bei fehlender Normalspannung immer ein hoher Verbundfaktor ermittelt wurde. Daraus kann man schlussfolgern, dass der Probekörper bei vorhandener Normalspannung durch Reibung und Verzahnung relativ große Normalspannungen aufnehmen konnte, jedoch bei fehlender Normalspannung wieder an der Schichtengrenzfläche gebrochen ist.

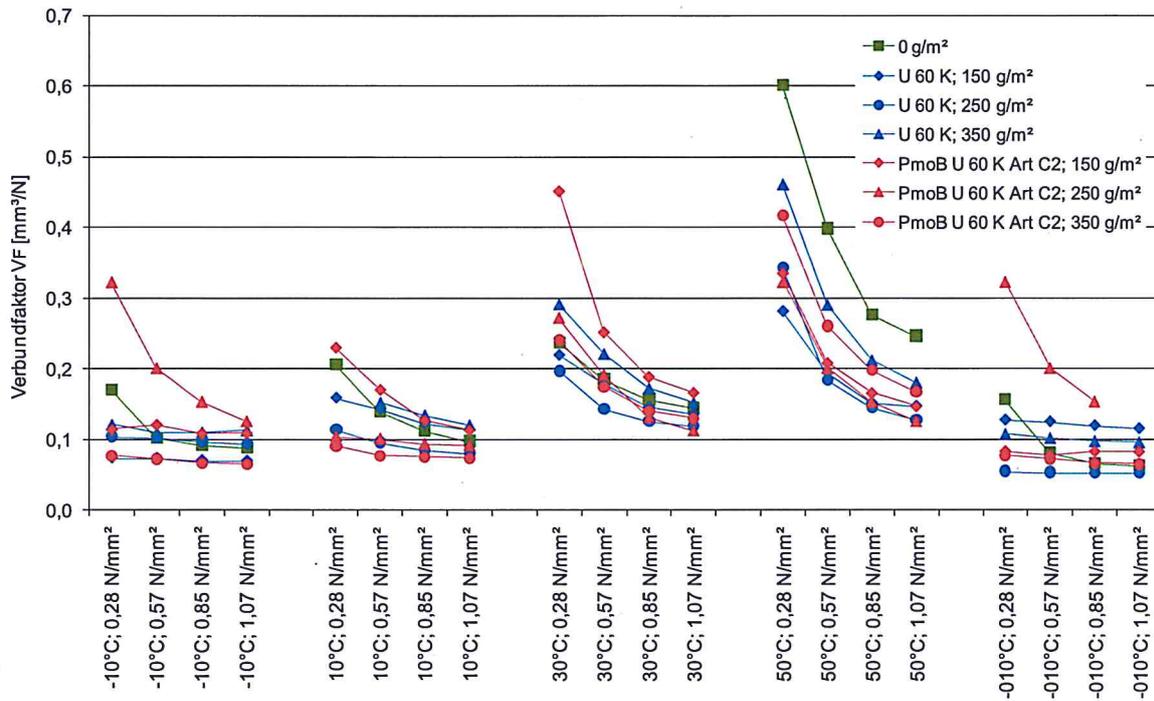


Abbildung 67: Vergleich der Ergebnisse der Verbundkombination Binderschicht-auf-Tragschicht, reduziert auf Normalspannungen $> 0,28 \text{ N/mm}^2$

Auch bei der Variante Binderschicht-auf-Tragschicht ist keine eindeutige Tendenz erkennbar, welche Art und Menge an Haftvermittler zu einer Verbesserung des Schichtenverbundes führt.

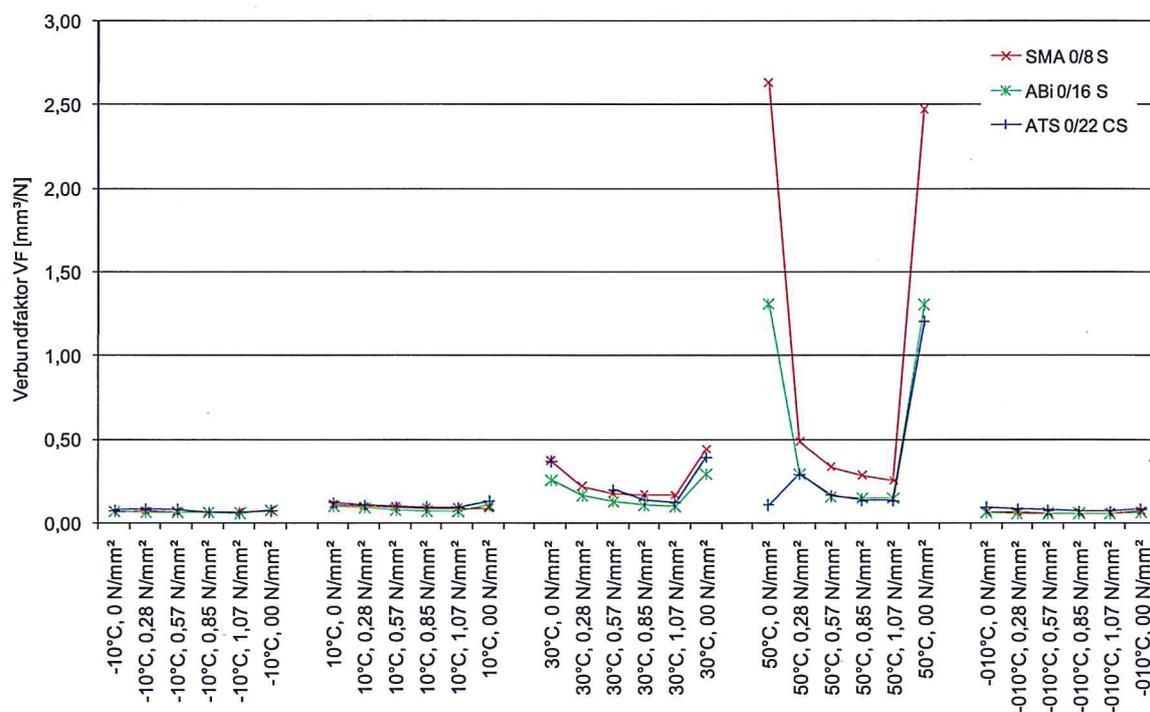


Abbildung 68: Vergleich der Verbundfaktoren der monolithischen Probekörper

Die ermittelten Verbundfaktoren für die monolithischen Probekörper sind bei allen Temperaturen etwas kleiner, als bei den zuvor beschriebenen Verbundkombinationen. Bei den Prüftemperaturen -10°C und 10°C ist kein Einfluss der Normalspannung erkennbar. Jedoch sind bei 30°C und 50°C Einflüsse der Normalspannung bei allen drei Materialvarianten vorhanden. Bei diesen Prüftemperaturen entspricht die Reihenfolge der Probekörper dem Größtkorn der Asphaltgemische. Der SMA 0/8 S hat das geringste Größtkorn und die größten Verbundfaktoren. Hier kann vermutlich der höhere Bindemittelanteil bedingt durch die Prüftemperatur nicht den Einfluss des Größtkorns ausgleichen.

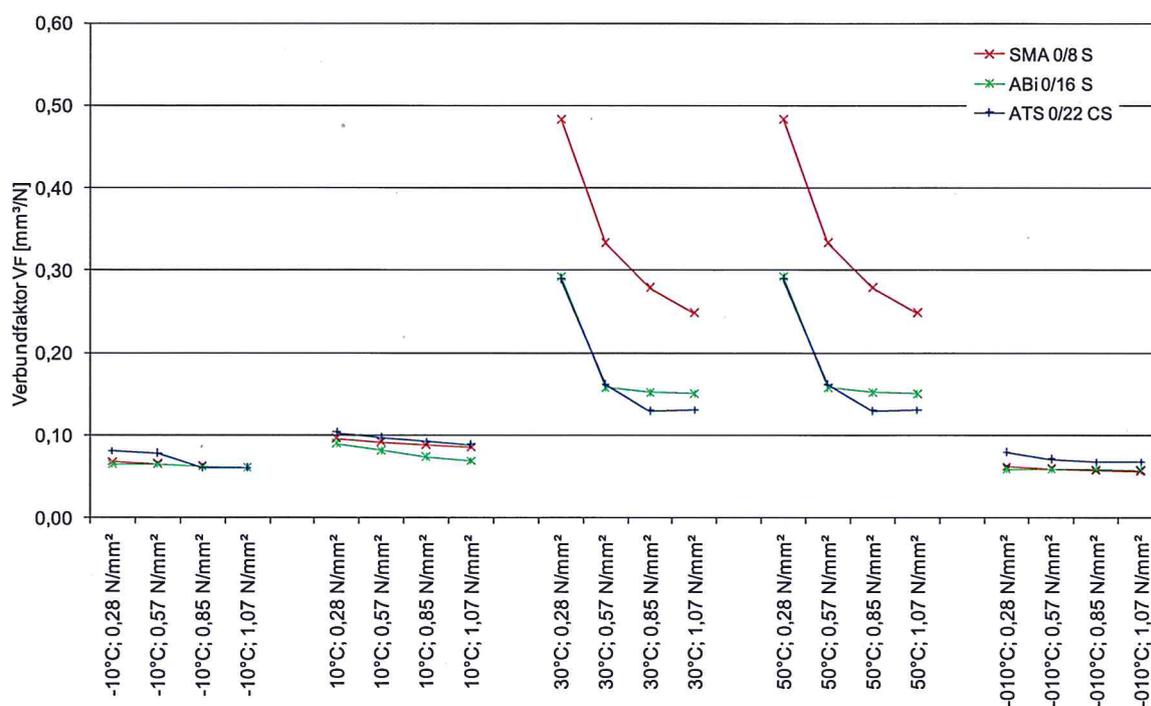


Abbildung 69: Vergleich der Verbundfaktoren der monolithischen Probekörper, reduziert auf Normalspannungen $> 0,28 \text{ N/mm}^2$

9.3. Ergebnisse der statischen Versuche

Die statischen Scherversuche wurden im Rahmen des Projektes für jede Verbundkombination nur einmal durchgeführt.

Die Prüfvorrichtung für die statischen Versuche ist, wie in Kapitel 6.2 auf Seite 47 beschrieben und abgebildet, mit zwei zusätzlichen Wegaufnehmern (IWA A und B) zur Messung des Scherwegs auf beiden Seiten der Prüfvorrichtung ausgerüstet. Die Regelung des Vorschubs erfolgt durch den Kolbenweg des Hydraulikzylinders. Die Probekörperdaten und Versuchsergebnisse für den Probekörper 1A sind in Tabelle 7 bzw. Tabelle 8 dargestellt.

Probekörperdaten

Material:	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S
Haftvermittlerart:	ohne
Haftvermittlermenge:	0 g/m ²
PK-Durchmesser:	153,45 mm

Tabelle 7: Probekörperdaten PK 1A

<u>Versuchsergebnisse</u>	
Scherkraft:	44,18 kN
korr. Scherkraft	42,22 kN
Korrekturfaktor:	0,956
Scherweg (Kolbenweg):	1,963 mm
Scherweg (IWA A):	0,828 mm
Scherweg (IWA B):	1,190 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,009 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	13,15 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	5,54 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	7,97 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	6,76 mm ³ /N

Tabelle 8: Versuchsergebnisse PK 1A

Die in Tabelle 8 aufgeführten Ergebnisse für die an den verschiedenen Stellen gemessenen Wege bei Erreichen der Scherkraft weichen deutlich voneinander ab. Die mit den zwei induktiven Wegaufnehmern A & B gemessenen Scherwege an der Prüfvorrichtung von 0,828 bzw. 1,190 mm unterscheiden sich deutlich gegenüber dem Kolbenweg von 1,965 mm. Die Scherweg-Scherkraftdiagramme für alle drei Wegaufnehmer sind in Abbildung 70 bzw. Anlage 2 dargestellt.

Die Abweichung zwischen den Wegaufnehmern A und B ist auf ein Kippen der Scherbacke während dem Versuch zurückzuführen. Am deutlichsten ist dieser Effekt bei den Probekörpern 26A und 28A zu erkennen. Das Kippen ist mit der nach ALP A-StB Teil 4 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 1999) beschriebenen und für die Versuche verwendeten Versuchseinrichtung nicht zu vermeiden, hat jedoch auf den gemessenen Kolbenweg keinen Einfluss.

Der Unterschied zwischen dem Kolbenweg und dem gemittelten Weg der induktiven Wegaufnehmer A & B an der Prüfvorrichtung mit einem Faktor von 1,95 bzw. einer Differenz von 0,954 mm, ist auf die Verformungen der Prüfmaschine zurückzuführen. Aufgrund dieser großen Abweichungen und vielen verschiedenen Bauarten von Prüfmaschinen muss daher zukünftig die Messung der Scherwege direkt an der Prüfvorrichtung vorgeschrieben werden.

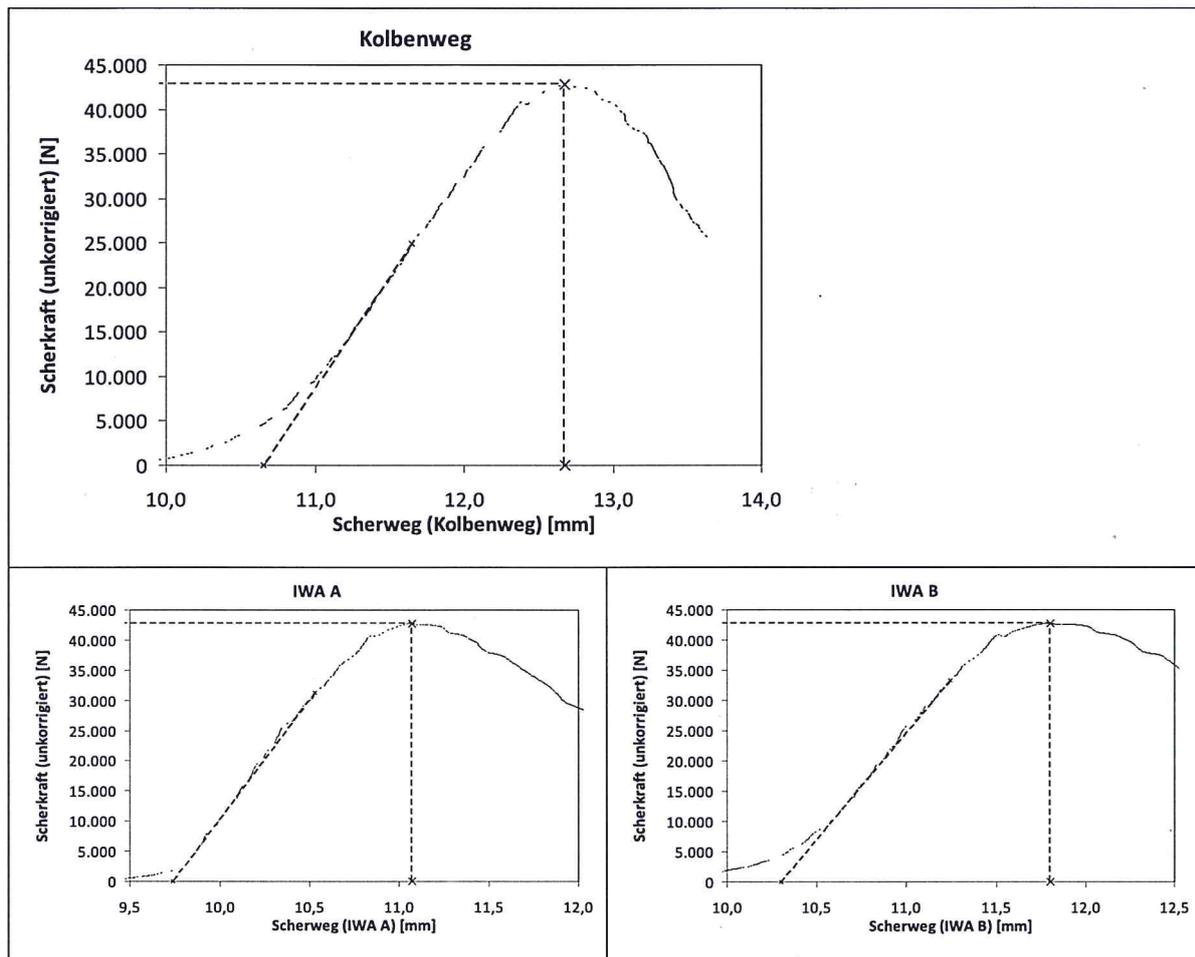


Abbildung 70: Gegenüberstellung der Scherweg-Scherkraft-Diagramme für PK 1A

Die gemessenen maximalen Scherkräfte sind in Tabelle 9 dargestellt. Diese Werte sind in Abbildung 71 jeweils in Abhängigkeit von Art und Menge des verwendeten Haftvermittlers als Diagramm grafisch dargestellt. Danach ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Art und Menge des Haftvermittlers. Die bei diesem Verfahren auftretenden Streuungen konnten jedoch aufgrund der nur mit einem je Verbundkombination zur Verfügung stehenden Probekörper nicht bewertet werden

Die gemessenen Scherkräfte entsprechen bei der Verbundkombination Deckschicht-auf-Binderschicht (SMA 0/8 S – ABi 0/16 S) den von (Stöckert, 2002) vorgeschlagenen 25 kN in jedem untersuchten Fall, jedoch ist bei der Verbundkombination Binderschicht-auf-Tragschicht (ABi 0/16 S – ATS 0/22 CS) bei 250 g/m² Bitumenemulsion U 60 K der vorgeschlagene Grenzwert von 20 kN mit 14,9 kN deutlich unterschritten. Da alle anderen Verbundkombinationen mit der gleichen Emulsion deutlich höhere

Scherkräfte aufweisen, kann nicht von einem systematischen Fehler bei der Herstellung der Probekörper ausgegangen werden. Die betreffende Verbundkombination müsste wiederholt werden, konnte jedoch aufgrund der benötigten Zeit für die Herstellung der Probekörper und der Prüfung des Schichtenverbundes mit dem statischen Scherversuch am Ende der Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden.

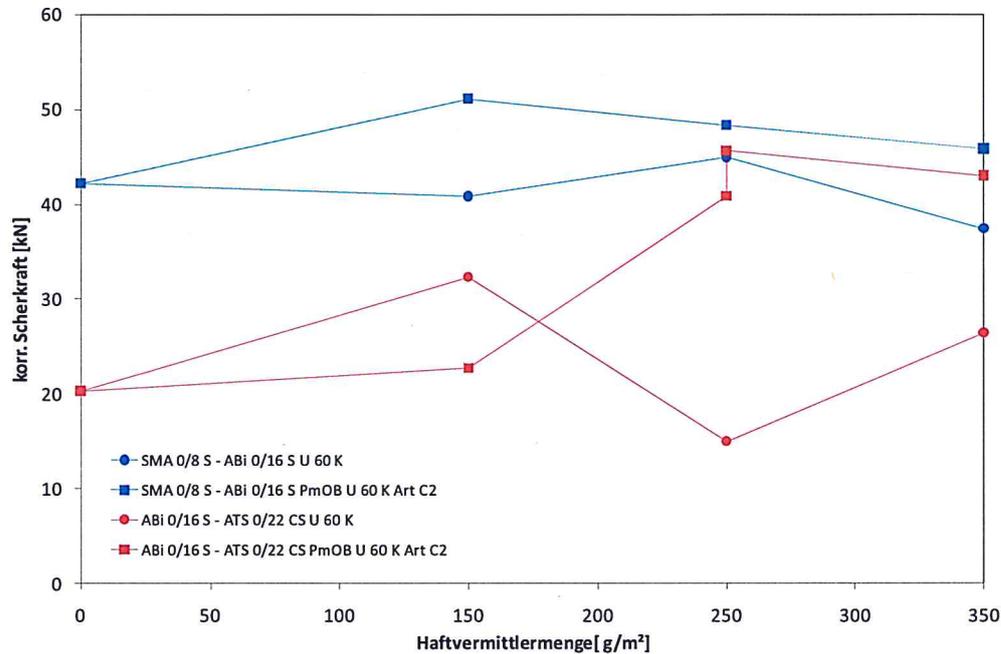


Abbildung 71: Scherkräfte in Abhängigkeit von Haftvermittlerart und -menge

PK-Nr.	Material-Kombination	Haftvermittlerart	Haftvermittlermenge [g/m ²]	PK-Durchmesser [mm]	Scherkraft [kN]	korr. Scherkraft [kN]	Scher-spannung [N/mm ²]	Korrekturfaktor [-]
PK 1A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	ohne	0	153,45	44,2	42,2	2,3891	0,956
PK 2A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	150	153,52	42,8	40,8	2,3106	0,955
PK 3A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	250	153,36	46,9	44,9	2,54	0,957
PK 4A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	350	153,37	39,1	37,4	2,1155	0,957
PK 5A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	150	153,48	53,5	51,1	2,8944	0,955
PK 6A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	250	153,38	50,5	48,3	2,7307	0,956
PK 8A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	350	153,12	47,8	45,8	2,5933	0,96
PK 11A	SMA 0/8 S	monolithisch	-	152,4	55,1	53,4	3,0203	0,969
PK 12A	ABi 0/16 S	monolithisch	-	152,47	61,1	59,1	3,3438	0,968
PK 13A	ATS 0/22 CS	monolithisch	-	152,47	41,4	40,1	2,2667	0,968
PK 21A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	ohne	0	152,41	20,9	20,3	1,1472	0,969
PK 22A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	150	152,41	33,3	32,3	1,8251	0,969
PK 23A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	250	152,4	15,4	14,9	0,8421	0,969
PK 24A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	350	152,3	27,2	26,4	1,4948	0,970
PK 25A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	150	152,3	23,4	22,7	1,2845	0,970
PK 26A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	250	152,29	42,0	40,8	2,3067	0,970
PK 27A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	250	152,29	47,0	45,6	2,5798	0,970
PK 28A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	350	152,39	44,4	43	2,4358	0,969

Tabelle 9: Ergebnisse der stat. Scherversuche, Scherkräfte

Die mit dem statischen Scherversuch gemessenen Scherwege bis zum Bruch des Probekörpers sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Die Scherwege (Kolbenweg) liegen entsprechend Abbildung 72 überwiegend im Bereich von 2,0 bis 2,5 mm. Lediglich die Scherwege bei der Verbundkombination Binderschicht-auf-Tragschicht (ABi 0/16 S – ATS 0/22 CS) mit der Emulsion U 60 K mit Mengen von 250 und 350 g/m² liegen etwas darunter. Bei dem Probekörper mit der Emulsion U 60 K mit einer Menge von 250 g/m² hatte sich eine geringe Scherkraft von nur 14,9 kN gezeigt.

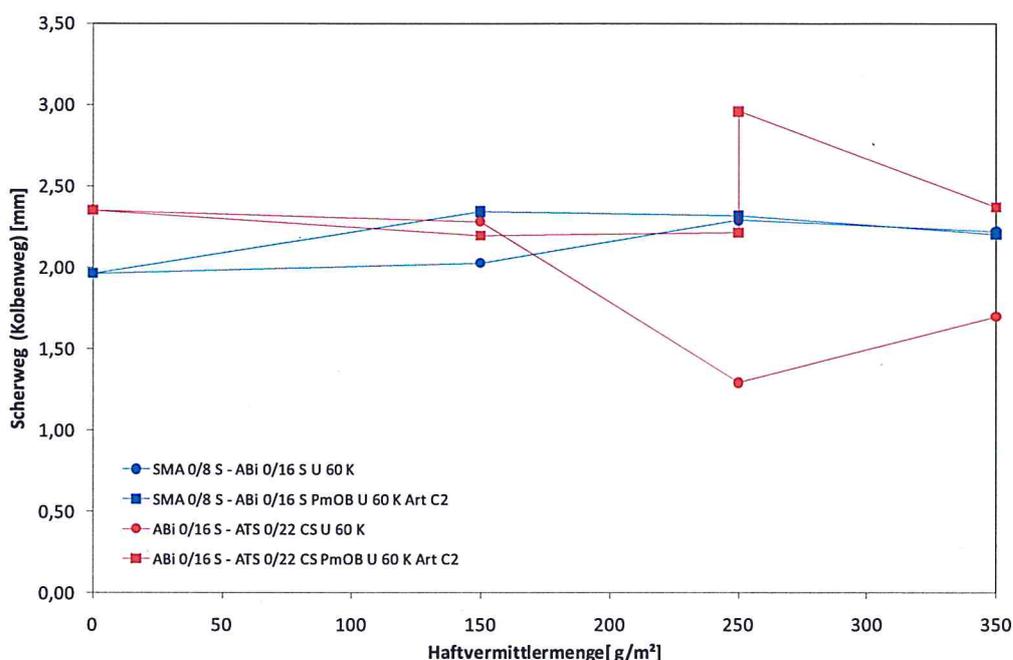


Abbildung 72: Scherwege in Abhängigkeit von Haftvermittlerart und -menge

PK-Nr.	Material-Kombination	Haftvermittlerart	Haftvermittlermenge [g/m²]	Scherweg (Kolb-w.) [mm]	Scherweg (IWA A) [mm]	Scherweg (IWA B) [mm]	MiWrt. Scherweg (IWA A&B) [mm]
PK 1A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	ohne	0	1,96	0,83	1,19	1,01
PK 2A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	150	2,03	1,33	1,50	1,42
PK 3A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	250	2,29	1,20	1,72	1,46
PK 4A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	350	2,22	1,21	1,56	1,38
PK 5A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	150	2,34	1,21	1,35	1,28
PK 6A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	250	2,32	1,12	1,56	1,34
PK 8A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	350	2,20	1,00	1,48	1,24
PK 11A	SMA 0/8 S	monolithisch	-	4,93	3,65	4,33	3,99
PK 12A	ABi 0/16 S	monolithisch	-	3,22	2,10	2,41	2,25
PK 13A	ATS 0/22 CS	monolithisch	-	3,13	2,15	2,30	2,23
PK 21A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	ohne	0	2,35	1,92	1,90	1,91
PK 22A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	150	2,28	1,11	2,17	1,64
PK 23A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	250	1,29	0,53	1,11	0,82
PK 24A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	350	1,70	0,87	1,24	1,06
PK 25A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	150	2,20	1,53	1,92	1,72
PK 26A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	250	2,21	1,15	1,43	1,29
PK 27A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	250	2,96	1,82	2,17	2,00
PK 28A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	350	2,37	1,16	1,62	1,39

Tabelle 10: Ergebnisse der stat. Scherversuche, Scherwege

Betrachtet man die Verbundfaktoren, als Quotienten aus Scherweg und Scherspannung, relativiert sich das Bild der Verbundkombination Binderschicht-auf-Tragschicht (ABi 0/16 S – ATS 0/22 CS). Der Faktor fällt nicht so deutlich aus dem Rahmen, wie Scherkraft und Scherspannung. Mit dieser Art der Darstellung ist bei dieser Verbundkombination tendenziell eine Abnahme des Verbundfaktors mit größerer Menge an Haftvermittler erkennbar. Dagegen liegen die Verbundfaktoren für alle Deckschicht-auf-Binderschicht-Kombinationen in einem sehr geringen Streubereich zwischen 12,9 und 16,8 mm³/N.

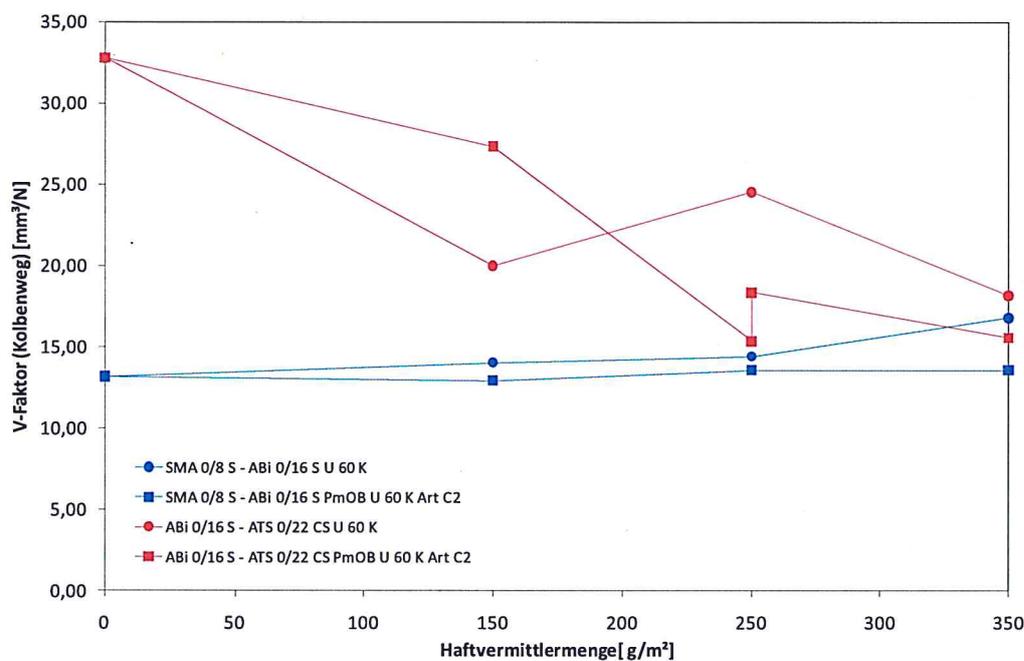


Abbildung 73: Verbund-Faktoren in Abhängigkeit von Haftvermittlerart und -menge

PK-Nr.	Material-Kombination	Haftvermittelerart	Haftvermittlermenge [g/m ²]	V-Faktor (Kolb.w.) [mm ³ /N]	V-Faktor (IWA A) [mm ³ /N]	V-Faktor (IWA B) [mm ³ /N]	V-Faktor (MW IWA A&B) [mm ³ /N]
PK 1A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	ohne	0	13,15	5,54	7,97	6,76
PK 2A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	150	14,03	9,22	10,39	9,80
PK 3A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	250	14,43	7,54	10,83	9,18
PK 4A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	U 60 K	350	16,79	9,14	11,80	10,47
PK 5A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	150	12,94	6,69	7,45	7,07
PK 6A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	250	13,57	6,59	9,13	7,86
PK 8A	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	PmOB U 60 K Art C2	350	13,57	6,15	9,14	7,64
PK 11A	SMA 0/8 S	monolithisch	-	26,12	19,34	22,92	21,13
PK 12A	ABi 0/16 S	monolithisch	-	15,40	10,03	11,51	10,77
PK 13A	ATS 0/22 CS	monolithisch	-	22,09	15,21	16,20	15,71
PK 21A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	ohne	0	32,76	26,82	26,55	26,69
PK 22A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	150	19,98	9,70	19,01	14,35
PK 23A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	250	24,51	10,02	21,01	15,52
PK 24A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	U 60 K	350	18,16	9,30	13,30	11,30
PK 25A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	150	27,35	19,04	23,86	21,45
PK 26A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	250	15,36	7,95	9,89	8,92
PK 27A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	250	18,34	11,30	13,47	12,39
PK 28A	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	PmOB U 60 K Art C2	350	15,57	7,61	10,62	9,11

Tabelle 11: Ergebnisse der stat. Scherversuche, AK-Faktoren

Die in Abbildung 74 dargestellte korrigierte Scherkraft für die monolithischen Probekörper aus Deck-, Binder- bzw. Tragschichtgemisch entsprechen dem erwarteten Bild, dass die Binderschicht die höchste und die Asphalttragschicht die geringste Scherfestigkeit zeigen. In dem Diagramm ist die korrigierte Scherkraft für den Asphaltbinder ABi 0/16 S zwar mit dargestellt, der wurde jedoch bei einer Scherkraft von 61 kN durch die Prüfmaschine zum Schutz der Anlage gegen Überlastung abgebrochen. Die Festigkeit des Probekörpers liegt noch um einiges höher, konnte jedoch nicht ermittelt werden.

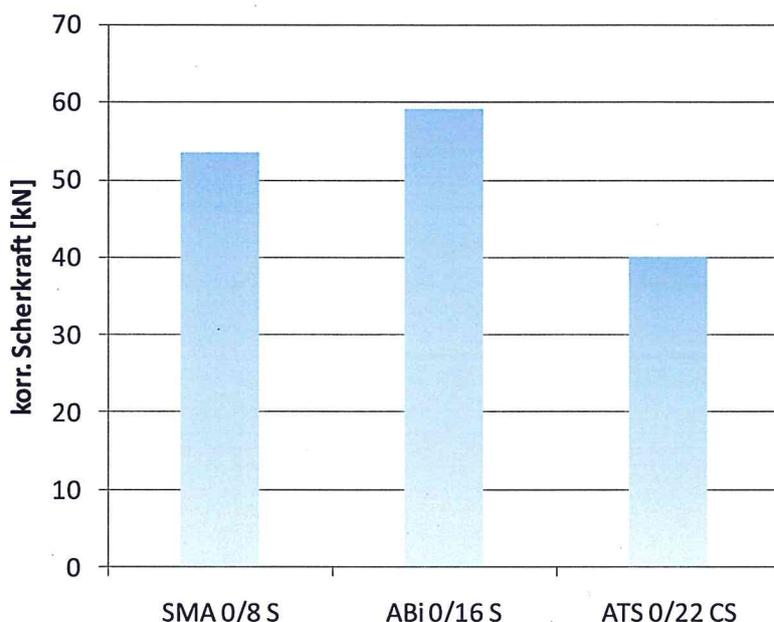


Abbildung 74: korrigierte Scherkräfte der monolithischen Probekörper

9.4. Vergleich der Versuchsergebnisse mit der statischen und dynamischen Prüfvorrichtung

Anhand der Ergebnisse der Versuche mit der statischen und dynamischen Prüfvorrichtung lässt sich keine Korrelation zwischen beiden Untersuchungsmethoden erkennen. Der Probekörper PK 21A (SMA 0/8 S – ABi 0/16 S, ohne Haftvermittler) hat mit 20,9 kN bei der statischen Prüfung die empfohlene Mindestscherkraft von 20 kN erfüllt, der Probekörper PK 21B aus der gleichen Platte ist jedoch bei den dynamischen Versuchen bereits bei einer Prüftemperatur von -10°C gebrochen.

In Abbildung 75 ist horizontal der mit der statischen Prüfvorrichtung ermittelte Verbundfaktor und vertikal der mit der dynamischen Prüfvorrichtung ermittelte Verbundfaktor bei Prüftemperatur 30°C , Frequenz 1 Hz und ohne Normalspannung angegeben. Bei dieser Darstellung ist keine Abhängigkeit zwischen den Versuchsergebnissen erkennbar. Auch die Einbeziehung der Scherkraft bei den statischen Versuchen und der Prüftemperatur 10°C bei den dynamischen Versuchen hat nicht zu deutlicheren Übereinstimmungen zwischen den Prüfmethoden geführt. Daraus kann geschlossen werden, dass mit der statischen Prüfvorrichtung ggf. nach gewiesen

werden kann, ob eine Verklebung der Schichten erfolgte. Eine Aussage zur Wirksamkeit des Schichtenverbundes und eine Aussage zur Nutzungsdauer der Befestigungen kann jedoch aus diesen Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

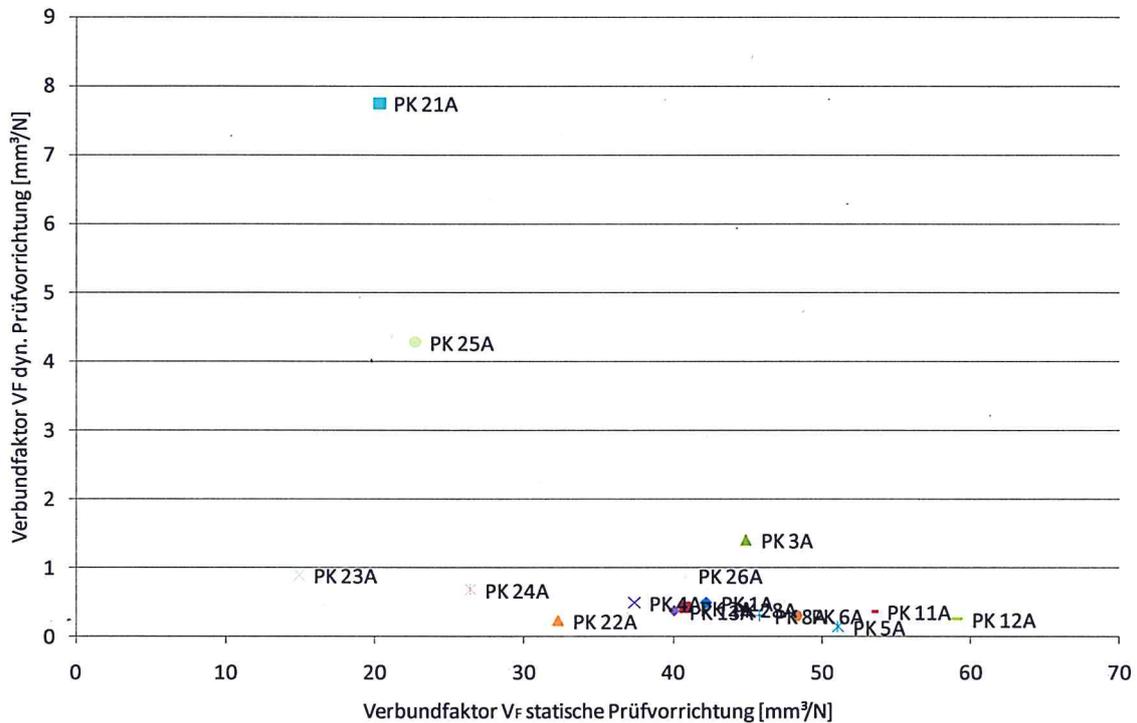


Abbildung 75: Vergleich der ermittelten Verbundfaktoren V_F mit der statischen Prüfvorrichtung und mit der dynamischen Prüfvorrichtung bei Prüftemperatur 30°C, Frequenz 1 Hz und Normalspannung 0 N/mm²

10. Auswirkungen des Schichtenverbundes auf die Dauerhaftigkeit von Straßenbefestigungen

Mit Hilfe eines Verbundmodells für Asphaltsschichten soll die Beschreibung der Scherspannungsübertragung zwischen zwei Asphaltsschichten in Abhängigkeit der maßgeblichen Einflussgrößen erfolgen. Dieses Verbundmodell muss die Einflussgrößen:

- Temperatur,
- Normalspannung und
- Schersteifigkeit (in Abhängigkeit von Scherweg/Scherspannung)

beinhalten.

Mit Hilfe von geeigneten Prüfverfahren müssen Parameter zur Beschreibung des Verbundmodells gewonnen werden können, um damit Berechnungen des Spannungs- und Verformungszustandes von Straßenbefestigungen durchführen zu können.

In den folgenden Abschnitten wird die Auswirkung der mit den zwei Prüfvorrichtungen ermittelten Verbundfaktoren auf den Spannungs- und Verformungszustand in Straßenkonstruktionen untersucht.

10.1. Statischer Scherversuch

Mit der Prüfvorrichtung für den statischen Versuch zur Ermittlung der Wirksamkeit des Schichtenverbundes nach LEUTNER [1] wird der Probekörper bei einer Temperatur und einer Vorschubgeschwindigkeit ohne Normalspannung bis zum Bruch geprüft und dabei die Scherkraft und der dazugehörige Scherweg ermittelt. Werden diese Parameter in GOODMAN's Law [17] nach Gleichung 4 eingesetzt, erhält man Verbundfaktoren V_F , die für den Bruchzustand gelten und damit für die Beanspruchung der Straßenbefestigung im Gebrauchszustand viel zu ungünstig sind, um damit Dimensionierungsberechnungen durchführen zu können. Wenn z. B. die in Tabelle 11 aufgelisteten Verbundfaktoren V_F als AK-Werte für Berechnungen mit der Mehrschichtentheorie verwendet werden, bekommt man die in Abbildung 76 dargestellten Verläufe für die Radialspannung in der Lastachse. Zur Vereinfachung kann hier für die drei Oberflächentemperaturen (-12,5°C/17,5°C/47,5°C) ein einheitlicher AK-Faktor von 10 mm³/N für beide Schichtengrenzflächen angesetzt werden. Die aus den Messungen bestimmten Werte liegen alle zwischen ca. 7 und 20 mm³/N, Berechnungen unter Annahme von 10 mm³/N ergeben die gleichen Beanspruchungen. Zum Vergleich erfolgte die jeweilige Berechnung mit vollem Verbund. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass bei Ansatz der aus den Versuchen ermittelten Faktoren viel zu große Radialspannungen an den Unterseiten der Schichten und zu geringere Radialspannungen an den Oberseiten der Schichten berechnet werden. Beide Fälle wirken sich ungünstig hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Straßenbefestigungen aus.

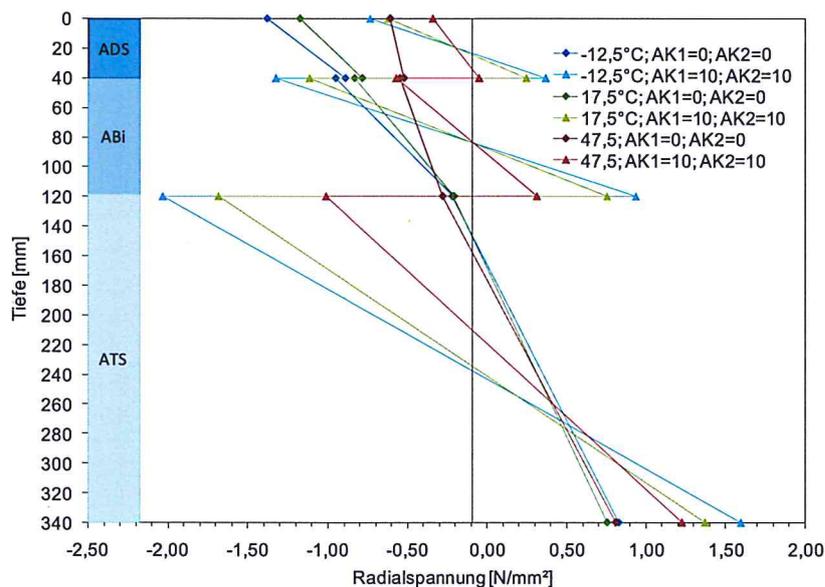


Abbildung 76: Berechnung mit Mehrschichtentheorie Verbundfaktor=AK-Faktor

10.2. Dynamischer Scherversuch

Für die mit Hilfe der Prüfvorrichtung für die durchgeführten dynamischen Versuche wurden im Vorfeld Berechnungen zur Abschätzung der Beanspruchung in den Schichtgrenzen von Straßenbefestigungen durchgeführt, und auf deren Grundlage die Versuchsparameter festgelegt. Dabei wurde das Ziel verfolgt, die Beanspruchung während der Versuche auf die in den Straßenbefestigungen auftretenden Größenordnungen abzustimmen. Mit den vor den Versuchen zur Verfügung stehenden Kenntnissen konnten für diese Berechnungen jedoch nur die Bereiche der erwarteten Scherwiderstände abgeschätzt werden. Anhand der jetzt neu vorliegenden Versuchsergebnisse ist auf der Grundlage von GOODMAN's Law nach Gleichung 4 die Bestimmung der Verbundfaktoren V_F bzw. Schermodule K_S möglich.

10.2.1. Auswirkungen des Schichtenverbundes auf den Spannungszustand in der Befestigung

In Anlage 4 sind die verwendeten Verbundfaktoren für die Berechnungen für den Schichtenverbund aufgelistet. Berechnet wurden die Radialspannungen an den Ober- und Unterseiten der Asphaltsschichten für:

- vollen Verbund (AK = 0,0 N/mm², theoretischer Wert),
- guten Verbund (abgeleitet aus den Versuchen, Verklebung ist wirksam) und
- schlechten Verbund (abgeleitet aus den Versuchen, keine Verklebung, nur Reibung ist wirksam)

jeweils getrennt nach der Schichtengrenzfläche in Abhängigkeit von der Normalspannung. Die Ergebnisse der Berechnungen für die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Varianten 1 und 2 sind in den folgenden vier Diagrammen getrennt für die Oberflächentemperatur -12°C und 47°C dargestellt.

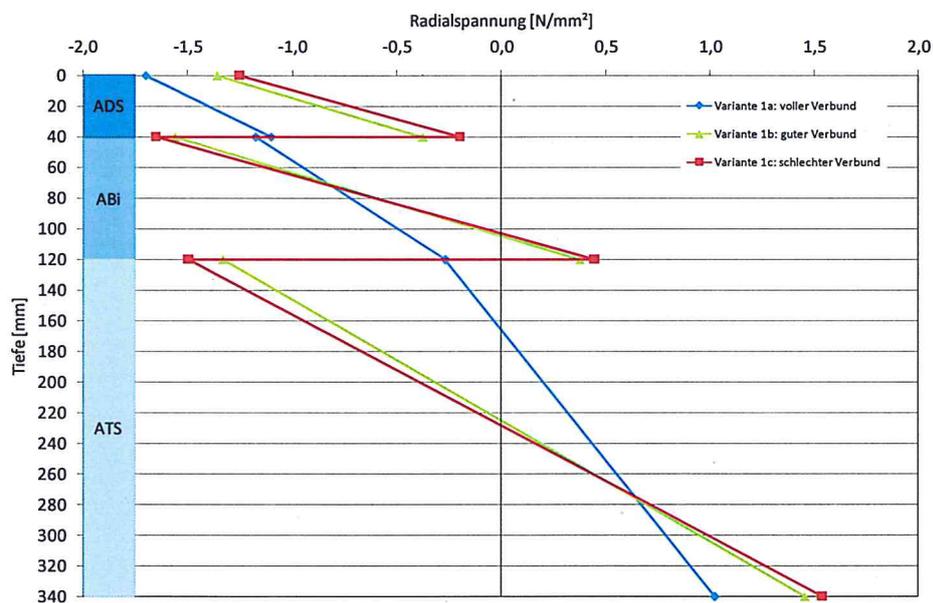


Abbildung 77: Variante 1, Oberflächentemperatur -12,5°C, berechnete Radialspannungen in der Lastachse

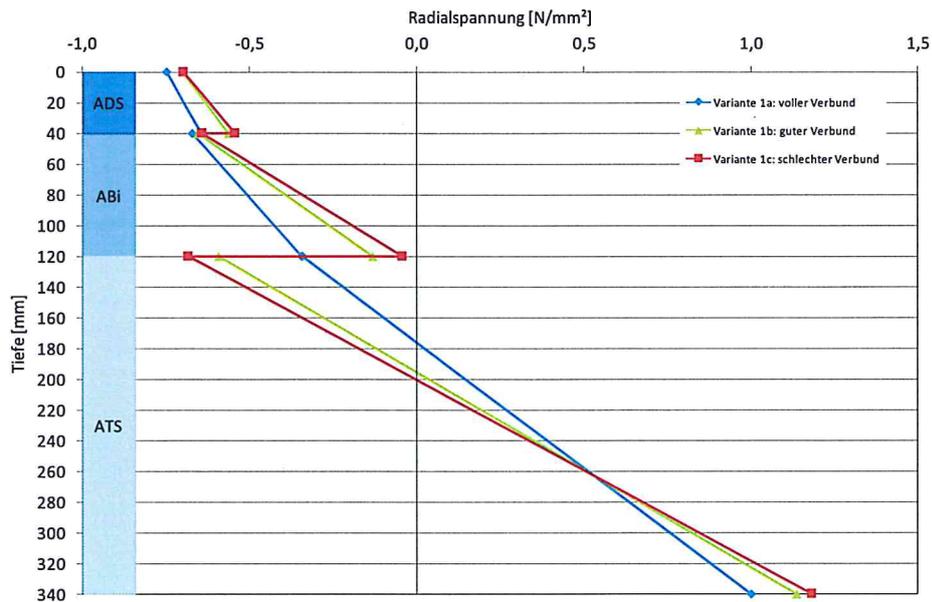


Abbildung 78: Variante 1, Oberflächentemperatur $47,5^\circ\text{C}$, berechnete Radialspannungen in der Lastachse

Bei allen untersuchten Varianten sind die Unterschiede zwischen vollem Verbund und gutem Verbund deutlich größer, als zwischen gutem und schlechtem Verbund. Die dimensionierungsrelevante Radialzugspannung an der Unterseite der Befestigung wird vor allem bei tiefen Temperaturen deutlich größer. Dies ist auf die besonders große Änderung der berechneten maximalen Scherspannung zwischen den Schichten bei tiefen Temperaturen zurückzuführen (Abbildung 24).

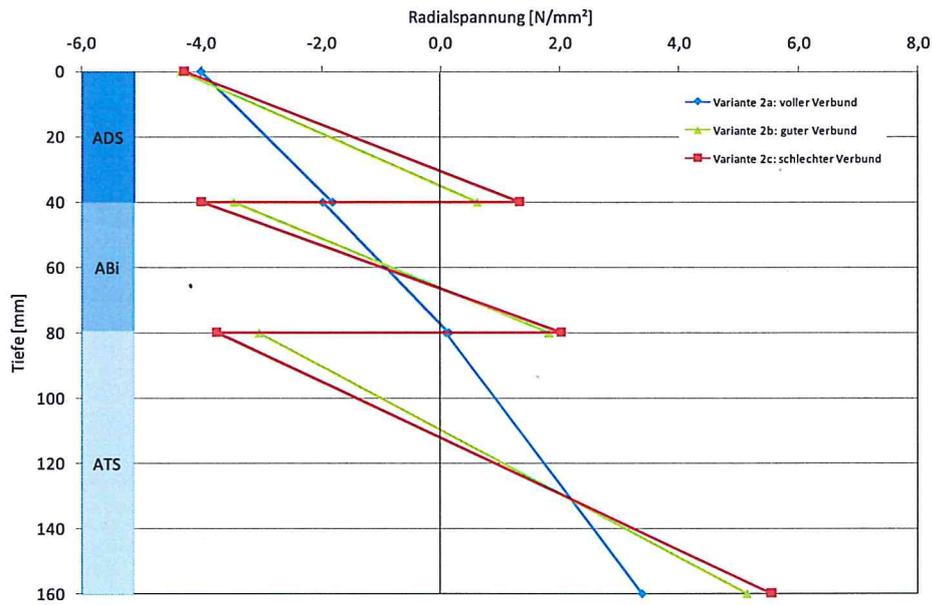


Abbildung 79: Variante 2, Oberflächentemperatur -12,5°C, berechnete Radialspannungen in der Lastachse

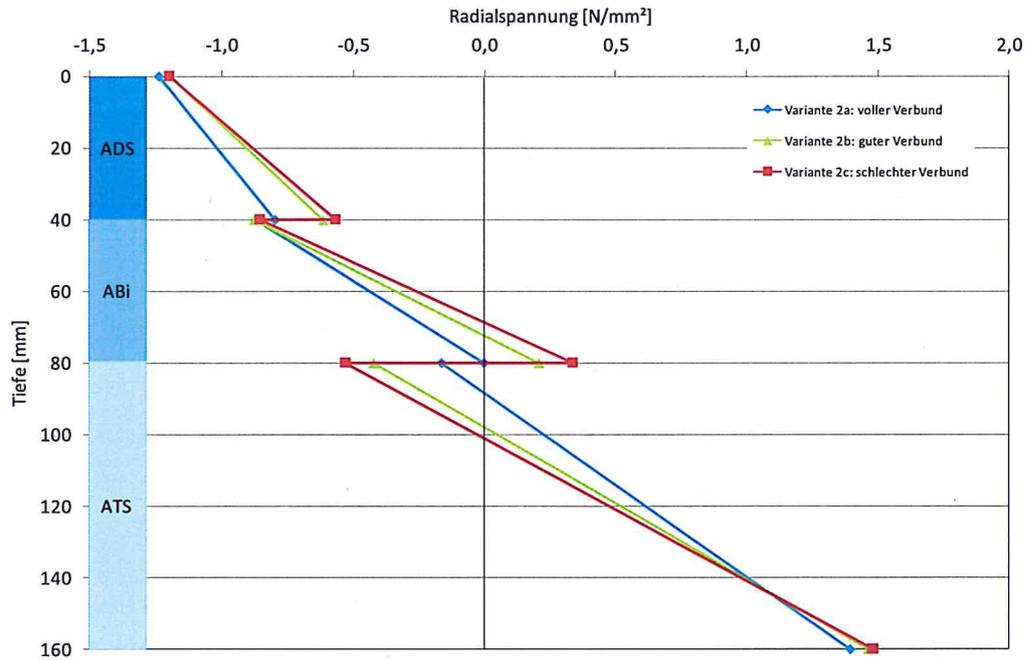


Abbildung 80: Variante 2, Oberflächentemperatur 47,5°C, berechnete Radialspannungen in der Lastachse

Die Radialdruckspannungen an den Oberseiten der Asphaltstraßenbefestigungen werden bei allen berechneten Varianten etwas kleiner. An den Schichtengrenzflä-

chen werden die berechneten Radialspannungen an den Unterseiten der Schichten teils wesentlich größer (teilweise entstehen Radialzugspannungen an den Unterseiten der Schichten) und an den Oberseiten der Schichten kleiner (größere Radialdruckspannungen).

10.2.2. Auswirkungen des Schichtenverbundes auf die Dauerhaftigkeit der Befestigungen

Nach dem in den RDO – Asphalt 07 [19] beschriebenen Verfahren zur Abschätzung der Ermüdung, wurden für zwei Straßenbefestigungen die Anzahl der maximal zulässigen Achsübergänge für jeweils:

- vollen Verbund,
- guten Verbund und
- schlechten Verbund

anhand der in Anlage 4 beschriebenen Parameter bestimmt. Für die Berechnung wurde die Ermüdungsfunktion für den Kalibrierasphalt nach den RDO Asphalt (Gleichung 21) verwendet.

$$N_{zul} = 2,8283 * \varepsilon^{-4,194}$$

Gleichung 21

Die in Tabelle 12 dargestellten Berechnungsergebnisse zur Ermüdung der Straßenbefestigungen bestätigen die im Abschnitt 0 beschriebenen größeren Unterschied zwischen vollem und gutem Verbund gegenüber gutem und schlechtem Verbund.

	Variante 1		Variante 2	
	[AÜ]	[%]	[AÜ]	[%]
voller Verbund	255.000.000	100	420.000	100
guter Verbund	108.000.000	42	230.000	55
schlechter Verbund	88.000.000	35	197.000	47

Tabelle 12: berechnete Anzahl maximaler Achsübergänge für die Varianten 1 und 2

Die Berechnungsergebnisse zeigen die Auswirkungen auf die Ermüdung bei, nach aktuellem Kenntnisstand, praxisnaher Berücksichtigung des Schichtenverbundes. In Abschnitt 4.1 wurde der, theoretisch anzunehmende, volle Schichtenverbund als Grenzzustand der vollständigen Übertragung der Spannungen über Verklebung,

Reibung und Verzahnung zwischen den Schichten beschrieben. Dieser Grenzzustand konnte mit den im Labor hergestellten und geprüften Probekörpern nicht erreicht werden.

Anhand der Versuchs- und darauf aufbauenden Berechnungsergebnisse muss die bisherige für Berechnungen i. d. R. getroffene Annahme des vollen Schichtenverbundes kritisch hinterfragt werden. Bei Bestätigung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen werden der Spannungs- und Verformungszustände in den Oberbauten bei Annahme der oben als gut bezeichneten Schichtenverbundfaktoren realitätsnäher beschrieben, so dass die präzisere Simulation des Verhaltens von Straßenbefestigungen den Dimensionierungsberechnungen zu Grunde gelegt werden kann.

11. Zusammenfassung

Zur Beschreibung des Schichtenverbundes von Asphaltbefestigungen insbesondere zur Erfassung von Eingangsparametern für die rechnerische Dimensionierung ist die entwickelte Prüfvorrichtung sowie das angewandte Prüfverfahren geeignet. Mit Hilfe der Methode sind neue Kenntnisse über die Auswirkungen der Einflussfaktoren Temperatur, Normalspannung, Scherweg und Prüffrequenz auf den Schichtenverbund gewonnen worden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Normalspannung bei allen Prüftemperaturen den größten Einfluss auf den Schichtenverbund hat. Die Einflussfaktoren Scherweg und Prüffrequenz gewinnen mit zunehmender Temperatur bzw. abnehmender Normalspannung an Bedeutung.

Sowohl für Deckschicht-auf-Binderschicht als auch für Binderschicht-auf-Tragschicht zeigte der Vergleich der Versuchsergebnisse keine eindeutigen Tendenzen der Auswirkung bezüglich der Haftvermittlerart- und menge auf die Wirksamkeit des Schichtenverbundes. Die Versuchsergebnisse von monolithischen Probekörpern ohne Schichtgrenzen zeigten einen wesentlich größeren Scherwiderstand als bei den zwei Varianten mit unterschiedlichen Verbundkombinationen sowie eine Reihung der Materialien entsprechend dem Größtkorn.

Aus den Versuchsergebnissen ist zu erkennen, dass bei Dimensionierungs- bzw. Prognoseberechnungen für von Straßenbefestigungen nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein vollständiger Verbund der Schichten erreichbar ist. Bedingt durch die schichtweise Herstellung der Asphaltbefestigungen entsteht zwischen den Schichten eine Störzone, in der die Wirkung von Verklebung, Reibung und Verzahnung der Gesteinskörnungen geringer ist, als innerhalb einer Schicht. Die Berücksichtigung eines gegenüber vollem Verbund veränderten Schichtenverbundfaktors für Dimensionierungs- und Prognoseberechnungen ist damit erforderlich. Aus den Versuchsergebnissen konnte ein entsprechender Vorschlag für die Annahme der Schichtenverbundfaktoren für guten und schlechten Schichtenverbund abgeleitet werden. Dieser Bedarf jedoch dringender Bestätigung durch weitere Untersuchungen.

Bedingt durch die Abhängigkeit des Schichtenverbundes von der Normalspannung sind Berechnungsmethoden für den Spannungs- und Verformungszustand in Asphaltstraßenbefestigungen notwendig, welche die Berücksichtigung der Normalspannungsverteilung auf den Schichtenverbundfaktor an den Schichtgrenzen ermöglicht. Dafür ist die Finite-Elemente-Methode geeignet. Bei dieser Methode ergibt sich jedoch bei Anwendung derzeitiger Rechentechnik ein zu hoher Rechenaufwand, um die notwendige Vielzahl an Berechnungen (bis zu 1600 Kombinationen von Lastklassen und Temperaturzuständen) zur Dimensionierung der Befestigungen bzw. Prognose der Nutzungsdauer durchführen zu können. Als vorläufige Lösung wird daher vorgeschlagen, einen konstanten Verbundfaktor für Berechnungen mit der Mehrschichtentheorie zu verwenden, welcher einen Schichtenverbundfaktor in Abhängigkeit von der Normalspannung im Bereich der größten Scherspannung in der Schichtengrenze berücksichtigt. Erste Berechnungen mit den aus den Versuchen ermittelten Verbundfaktoren für guten (Verklebung voll wirksam) bzw. schlechten (keine Verklebung, nur Reibung ist wirksam) Verbund zeigten, dass sich die Nutzungsdauer bei schlechtem Verbund um 20 % verringern kann.

12. Ausblick

In diesem Projekt wurden nur Bohrkerne aus im Labor hergestellten Platten antragsgemäß für die Verbundkombinationen Deckschicht-Binderschicht und Binderschicht-Tragschicht geprüft. Für zukünftigen Untersuchungen ist wegen der festgestellten Abhängigkeit der Verbundwirkung vom Größtkorn der Schichten auch die Verbundvariante Tragschicht-Tragschicht sowie wegen der in Realität von den Laborbedingungen abweichenden Herstellung der Schichten bzw. des Schichtenverbundes ist die Untersuchung von aus Straßenbefestigungen entnommenen Bohrkernen von Interesse.

Die Versuchsergebnisse zeigten eine Verbesserung der Wirkung des Schichtenverbundes durch die Belastungen während des Versuchsprogramms. Der Effekt der Verbesserung des Schichtenverbundes von Straßenbefestigungen durch sommerliche Wärmeperioden und Schwerverkehr ist bekannt. Begleitende Untersuchungen an Versuchstrecken sollte für die Dimensionierung erforderliche Kenntnisse über die Wirkung des Schichtenverbundes über die Nutzungszeit von Straßen ergeben.

Die gezielte Suche nach den wirtschaftlich und technisch geeignetsten Anspritzmengen für die Gewährleistung eines guten Schichtenverbundes ist für Auftraggeber und Auftragnehmer im Straßenbau gleichermaßen von großer Bedeutung. Zur Erreichung des bestmöglichen Schichtenverbundes und der damit verbundenen wirtschaftlichen Vorteile ist eine Anwendung von härteren Bindemitteln für den Haftvermittler sehr sinnvoll und ist zu untersuchen. Damit könnte der Schichtenverbund besonders bei höheren Temperaturen verbessert werden.

Zur Beschreibung des Schichtenverbundes von Asphaltsschichten insbesondere zur Erfassung von Eingangsparmetern für Dimensionierungsberechnungen ist die entwickelte Prüfvorrichtung sowie das Prüfverfahren als geeignet anzusehen. Daher sollte für beides eine Prüfvorschrift entwickelt werden, auf deren Grundlage die Ausrüstung geeigneter Prüfmaschinen mit Prüfvorrichtungen erfolgen kann.

13. Literaturverzeichnis

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): ALP A-StB Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner, FGSV-Verlag, Köln, 1999
- [2] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV): RVS 11.065 Teil 1: Grundlagen / Prüfverfahren / Haftverbund von Asphaltsschichten, Wien, 1999
- [3] Augustin, H., Fellner, G., Nievelt, H., Pass, F., & Tschegg, E.: Bemessung von Haftbrücken - Straßenforschung Heft 469, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 1997.
- [4] Raab, C., & Partl, M.: Effect of Tack Coats on Interlayershear Bond of Pavements, Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA '04), 2004
- [5] Sholar, G. A., Page, G. C., Musselman, J. A., Upshaw, P. B., & Moseley, H. L.: Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats, Florida Department of Transportation, Gainesville, USA, 2003
- [6] Stöckert, U.: Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau. Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, 2002
- [7] Kruntcheva, M. R.: Feasibility of Assessing Bond Condition of Asphalt Concrete Layers with Dynamic Nondestructive Testing. ASCE Journal of Transportation Engineering, 130/4, Jul/August, pp.510-518, 2004
- [8] Canestrari, F., Ferrotti, G., Partl, M. N., & Santagata, E.: Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance. Istituto di Idraulica e Infrastrutture Viarie Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy; EMPA, Switzerland; Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, 2004
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): ZTV-SIB 90, Köln, FGSV-Verlag, 1990
- [10] Hakim, B. A.: The importance of good bond between bituminous layers, 9th International Conference on Design of Asphalt Pavements, 2002
- [11] Shell: BISAR (Bitumen Structures Analysis in Roads), 1979

-
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO 01), FGSV-Verlag, Köln, 2001
- [13] Francken, L., & Verstraeten, J. (1974). Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending, Transportation Research Record 515, pp 114-123
- [14] Hess, R.: Kalibrierung von Verhaltensmodellen für das Straßenerhaltungsmanagement, Universität Hannover, Fachbereich Konstruktiver Straßenbau: Diplomarbeit, 1998
- [15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): ALP A-StB Teil 11: Herstellung von Asphaltprobeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV), Köln, FGSV-Verlag, 2003
- [16] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): DIN EN 12697-24:2004: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2004
- [17] Goodman, R. E., Taylor, R. L., & Brekke, T. L.: A model for the mechanics of jointed rock, Journal of Soil Mech. Found, Seite 637-658, 1968
- [18] Haorig, A: Schichtenverbund von Asphaltbefestigungen - Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens, TU Dresden, Fak. Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, 2006
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke (RDO-Asphalt 07), Entwurf 2007.

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Berechnungen zur Festlegung der Versuchsparameter

Anlage 2: Versuchsergebnisse des statischen Scherversuchs
nach LEUTNER

Anlage 3: Versuchsergebnisse des dynamischen Scherversuchs

Anlage 4: Auswirkung der Versuchsergebnisse auf die Dimensionierung

Anlage 1.1: Befestigungsaufbauten der berechneten Varianten

Schichtdicke [mm]	Mischgutart	Bindemittel
Variante 1		
40	SMA 0/8 S	Bitumen 50/70
80	ABi 0/16 S	Bitumen 30/45
220	ATS 0/32 CS	Bitumen 50/70
560	FSS	$E_{V2}=120 \text{ MN/m}^2$
Variante 2		
40	SMA 0/8 S	Bitumen 50/70
40	ABi 0/16 S	Bitumen 30/45
80	ATS 0/22 CS	Bitumen 50/70
740	FSS	$E_{V2}=120 \text{ MN/m}^2$
Variante 3		
40	SMA 0/8 S	Bitumen 50/70
300	ATS 0/32 CS	Bitumen 50/70
560	FSS	$E_{V2}=120 \text{ MN/m}^2$
Variante 4		
40	SMA 0/8 S	Bitumen 50/70
100	ATS 0/32 CS	Bitumen 50/70
560	FSS	$E_{V2}=120 \text{ MN/m}^2$

Tabelle 13: Befestigungsaufbauten und verwendete Materialdaten zur Berechnung

Material	Schichtdicke [mm]	Tiefe [mm]	-12,5°C [N/mm ²]	17,5°C [N/mm ²]	47,5°C [N/mm ²]
SMA 0/8 S	0	0	23516	7162	413
	10	10	23516	7162	413
	10	20	23233	7146	460
	10	30	22968	7131	509
	10	40	22719	7117	558
Abi 0/16 S	10	50	25531	8067	690
	10	60	25279	8054	748
	10	70	25040	8041	807
	10	80	24814	8029	866
	10	90	24597	8018	925
	10	100	24391	8008	986
	10	110	24193	7998	1047
	10	120	24003	7988	1109
ATS 0/22 CS	20	140	22644	7609	1147
	20	160	22322	7593	1268
	20	180	22021	7578	1391
	20	200	21740	7565	1516
	20	220	21475	7552	1643
	20	240	21225	7540	1771
	20	260	20989	7529	1901
	20	280	20764	7519	2032
	20	300	20551	7509	2165
	20	320	20347	7499	2299
	10	330	20200	7492	2401
	10	340	20105	7488	2469
	560	900	122	122	122
		> 560	45	45	45

Tabelle 14: E-Moduln für Variante 1

Anlage 1.2: Ergebnisse der Berechnungen

Temperatur [°C]	AK1 [mm²/N]	AK2 [mm²/N]	Position [mm]	Weg [mm]	ADS-ABi			
					Scherspannung [N/mm²]	Vertikalspannung [N/mm²]	Scherkraft [kN]	Normalkraft [kN]
-12,5	0,0	0,0	140	0,000	0,266	-0,488	2,09	-3,83
	0,1	0,1	160	0,004	0,039	-0,244	0,30	-1,92
	0,2	0,2	160	0,005	0,023	-0,246	0,18	-1,93
	0,4	0,4	160	0,005	0,013	-0,247	0,10	-1,94
	0,6	0,6	160	0,005	0,009	-0,249	0,07	-1,96
	0,8	0,8	160	0,006	0,007	-0,247	0,06	-1,94
	1,0	1,0	160	0,006	0,006	-0,247	0,05	-1,94
	1,2	1,2	160	0,006	0,005	-0,248	0,04	-1,94
	1,4	1,4	160	0,006	0,004	-0,248	0,03	-1,94
	1,6	1,6	160	0,006	0,004	-0,248	0,03	-1,94
	1,8	1,8	160	0,006	0,003	-0,248	0,03	-1,95
	2,0	2,0	500	0,006	0,003	0,000	0,02	0,00
	5,0	5,0	500	0,007	0,001	0,000	0,01	0,00
	10,0	10,0	1000	0,007	0,001	0,000	0,01	0,00
	0,0	10,0	140	0,000	0,287	-0,484	2,25	-3,80
10,0	0,0	1000	0,010	0,001	0,000	0,01	0,00	
17,5	0,0	0,0	140	0,000	0,258	-0,490	2,02	-3,85
	0,1	0,1	140	0,008	0,077	-0,508	0,61	-3,99
	0,2	0,2	160	0,010	0,049	-0,243	0,39	-1,91
	0,4	0,4	160	0,012	0,030	-0,245	0,23	-1,92
	0,6	0,6	160	0,013	0,021	-0,245	0,17	-1,93
	0,8	0,8	160	0,014	0,017	-0,246	0,13	-1,93
	1,0	1,0	160	0,014	0,014	-0,246	0,11	-1,93
	1,2	1,2	160	0,014	0,012	-0,246	0,09	-1,93
	1,4	1,4	160	0,015	0,010	-0,247	0,08	-1,94
	1,6	1,6	160	0,015	0,009	-0,247	0,07	-1,94
	1,8	1,8	160	0,015	0,008	-0,247	0,07	-1,94
	2,0	2,0	160	0,015	0,008	0,247	0,06	1,94
	5,0	5,0	160	0,016	0,003	-0,247	0,03	-1,94
	10,0	10,0	160	0,017	0,002	-0,248	0,01	-1,94
	0,0	10,0	140	0,000	0,274	-0,488	2,15	-3,83
10,0	0,0	160	0,018	0,002	-0,248	0,01	-1,95	
47,5	0,0	0,0	140	0,000	0,209	-0,508	1,64	-3,99
	0,1	0,1	140	0,015	0,155	-0,503	1,22	-3,95
	0,2	0,2	140	0,026	0,128	-0,517	1,01	-4,06
	0,4	0,4	140	0,039	0,097	-0,520	0,76	-4,09
	0,6	0,6	140	0,047	0,079	-0,522	0,62	-4,10
	0,8	0,8	140	0,053	0,067	-0,524	0,52	-4,11
	1,0	1,0	140	0,058	0,058	-0,524	0,46	-4,12
	1,2	1,2	140	0,062	0,051	-0,525	0,40	-4,12
	1,4	1,4	140	0,065	0,046	-0,526	0,36	-4,13
	1,6	1,6	140	0,067	0,042	-0,526	0,33	-4,13
	1,8	1,8	140	0,070	0,039	-0,527	0,30	-4,14
	2,0	2,0	140	0,071	0,036	-0,527	0,28	-4,14
	5,0	5,0	140	0,085	0,017	-0,529	0,13	-4,16
	10,0	10,0	140	0,091	0,009	-0,530	0,07	-4,17
	0,0	10,0	140	0,000	0,210	-0,508	1,65	-3,99
10,0	0,0	160	0,100	0,010	-0,240	0,08	-1,89	

Tabelle 15: Variante1, ADS,ABi, Maximale Scherspannungen

Temperatur [°C]	AK1 [mm³/N]	AK2 [mm³/N]	Position [mm]	Weg [mm]	ABi-ATS			
					Scherspannung [N/mm²]	Vertikalspannung [N/mm²]	Scherkraft [kN]	Normalkraft [kN]
-12,5	0,0	0,0	160	0,000	0,228	-0,212	1,79	-1,67
	0,1	0,1	200	0,006	0,057	-0,093	0,45	-0,73
	0,2	0,2	300	0,007	0,037	0,010	0,29	0,08
	0,4	0,4	500	0,010	0,024	0,002	0,19	0,02
	0,6	0,6	500	0,011	0,019	0,002	0,15	0,02
	0,8	0,8	500	0,012	0,015	0,002	0,12	0,01
	1,0	1,0	500	0,013	0,013	0,002	0,10	0,01
	1,2	1,2	500	0,013	0,011	0,001	0,09	0,01
	1,4	1,4	500	0,014	0,010	0,001	0,08	0,01
	1,6	1,6	500	0,014	0,009	0,001	0,07	0,01
	1,8	1,8	500	0,015	0,008	0,001	0,06	0,01
	2,0	2,0	500	0,015	0,007	0,001	0,06	0,01
	5,0	5,0	1000	0,017	0,003	0,000	0,03	0,00
	10,0	10,0	1000	0,018	0,002	0,000	0,01	0,00
	0,0	10,0	1000	0,019	0,002	-0,001	0,01	0,00
10,0	0,0	140	0,000	0,258	-0,343	2,02	-2,70	
17,5	0,0	0,0	160	0,000	0,223	-0,218	1,75	-1,71
	0,1	0,1	180	0,010	0,098	-0,155	0,77	-1,22
	0,2	0,2	180	0,014	0,068	-0,162	0,53	-1,27
	0,4	0,4	200	0,017	0,044	-0,097	0,34	-0,76
	0,6	0,6	220	0,020	0,033	-0,050	0,26	-0,39
	0,8	0,8	240	0,021	0,027	-0,021	0,21	-0,16
	1,0	1,0	300	0,023	0,023	-0,008	0,18	-0,06
	1,2	1,2	300	0,024	0,020	0,007	0,16	0,06
	1,4	1,4	300	0,025	0,018	0,007	0,14	0,06
	1,6	1,6	300	0,026	0,016	0,007	0,13	0,05
	1,8	1,8	300	0,026	0,015	0,007	0,11	0,05
	2,0	2,0	500	0,027	0,013	0,001	0,11	0,01
	5,0	5,0	500	0,032	0,006	0,000	0,05	0,00
	10,0	10,0	500	0,034	0,003	0,000	0,03	0,00
	0,0	10,0	500	0,036	0,004	0,000	0,03	0,00
10,0	0,0	140	0,000	0,251	-0,349	1,97	-2,74	
47,5	0,0	0,0	140	0,199	0,333	-0,254	2,61	-1,99
	0,1	0,1	140	0,015	0,154	-0,347	1,21	-2,73
	0,2	0,2	160	0,026	0,128	-0,255	1,01	-2,00
	0,4	0,4	160	0,039	0,098	-0,260	0,77	-2,04
	0,6	0,6	160	0,478	0,080	0,264	0,63	2,07
	0,8	0,8	160	0,054	0,068	-0,267	0,53	-2,10
	1,0	1,0	160	0,059	0,059	-0,269	0,46	-2,12
	1,2	1,2	160	0,063	0,052	-0,271	0,41	-2,13
	1,4	1,4	160	0,066	0,047	-0,273	0,37	-2,14
	1,6	1,6	160	0,069	0,043	-0,274	0,34	-2,16
	1,8	1,8	160	0,071	0,039	-0,276	0,31	-2,16
	2,0	2,0	160	0,073	0,037	-0,277	0,29	-2,17
	5,0	5,0	180	0,088	0,018	-0,176	0,14	-1,38
	10,0	10,0	180	0,096	0,010	-0,178	0,08	-1,40
	0,0	10,0	200	0,099	0,010	-0,128	0,08	-1,01
10,0	0,0	140	0,000	0,215	-0,377	1,69	-2,96	

Tabelle 16: Variante 1, ABi-ATS, Maximale Scherspannungen

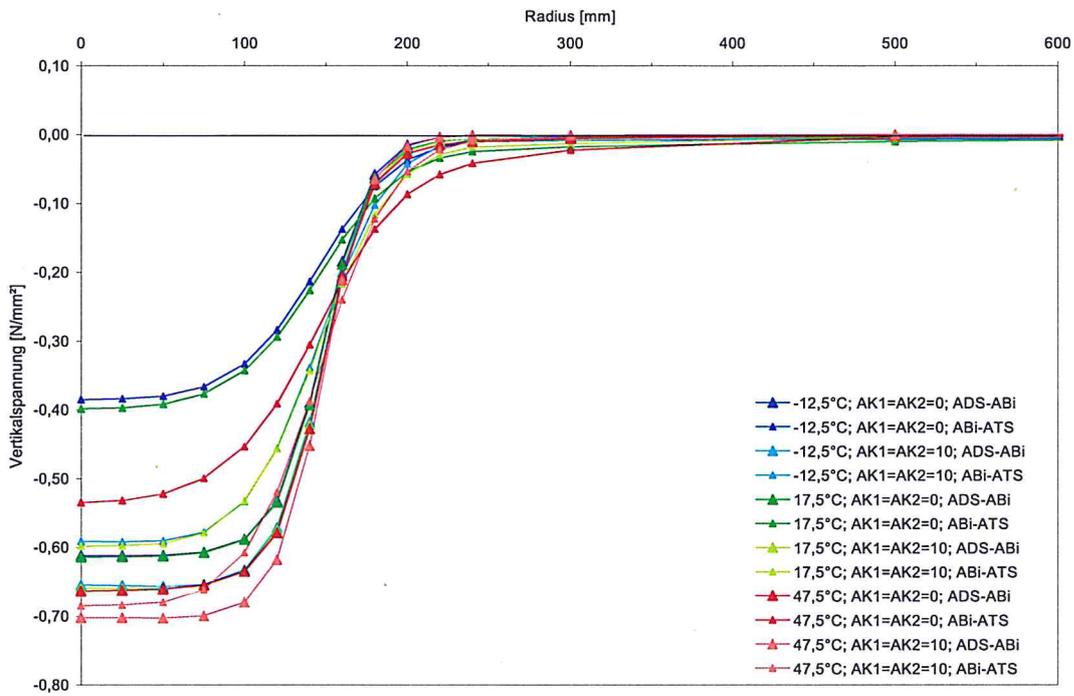


Abbildung 81: Variante 2, Vertikalspannungen an den Schichtgrenzen

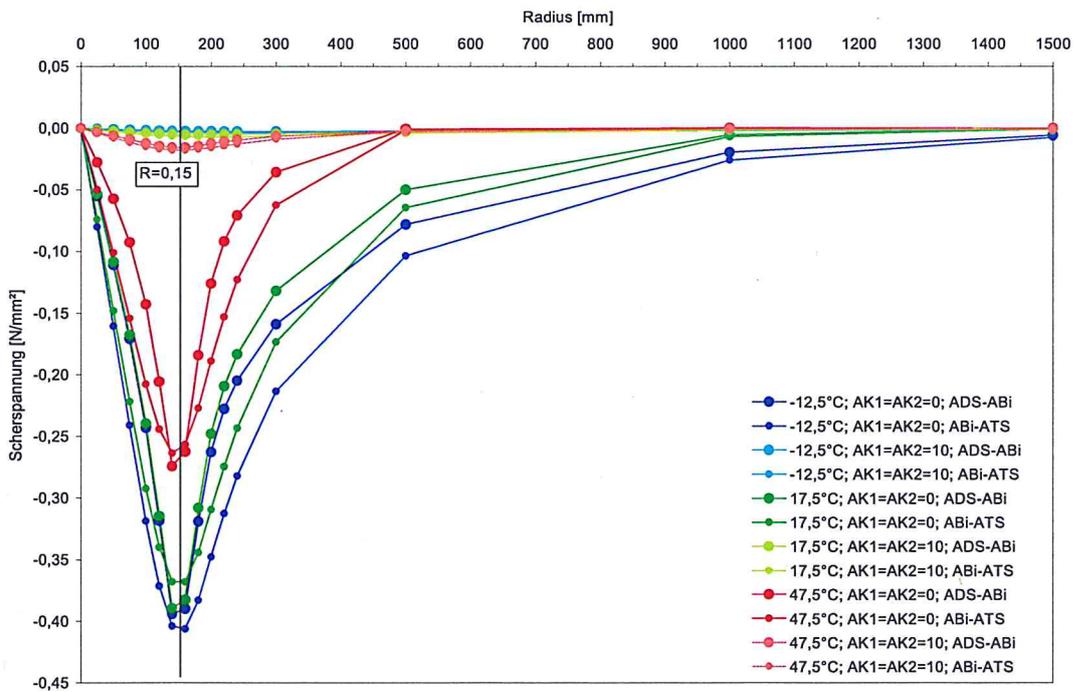


Abbildung 82: Variante 2, Scherspannungen an den Schichtgrenzen

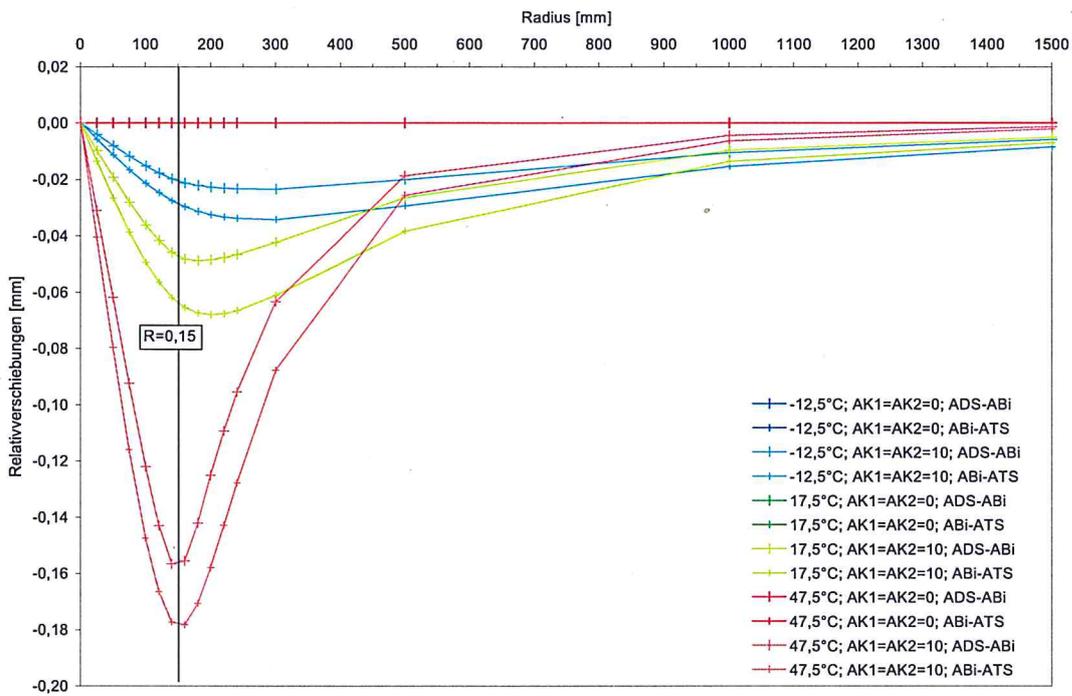


Abbildung 83: Variante 2, Relativverschiebungen an den Schichtgrenzen

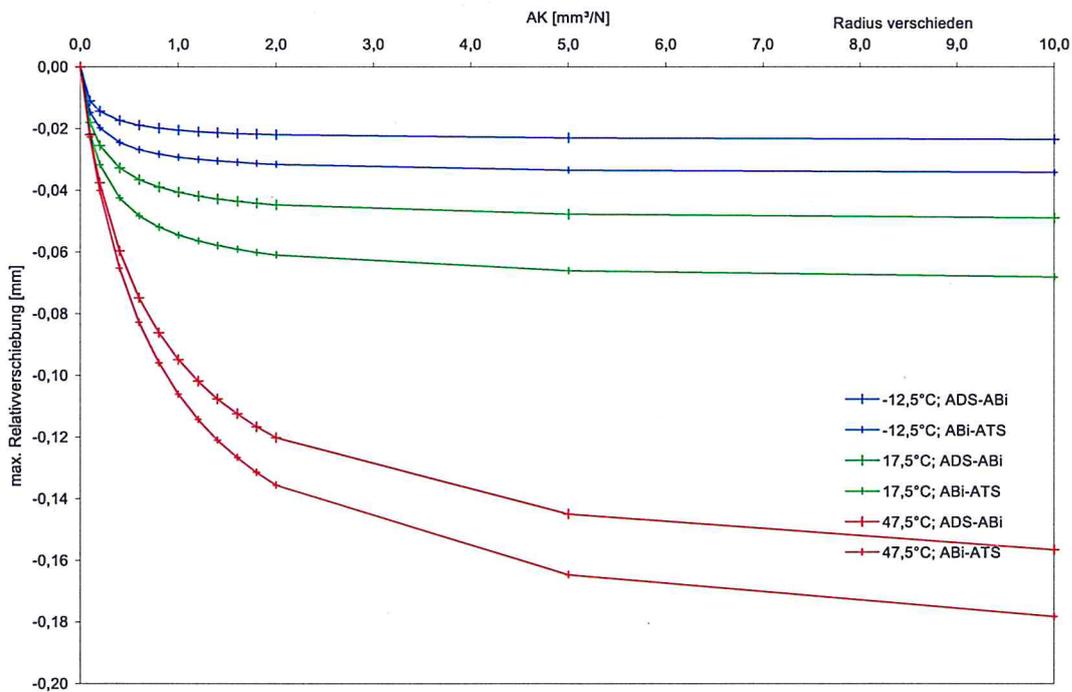


Abbildung 84: Variante 2, Maximale Relativverschiebungen an den Schichtgrenzen

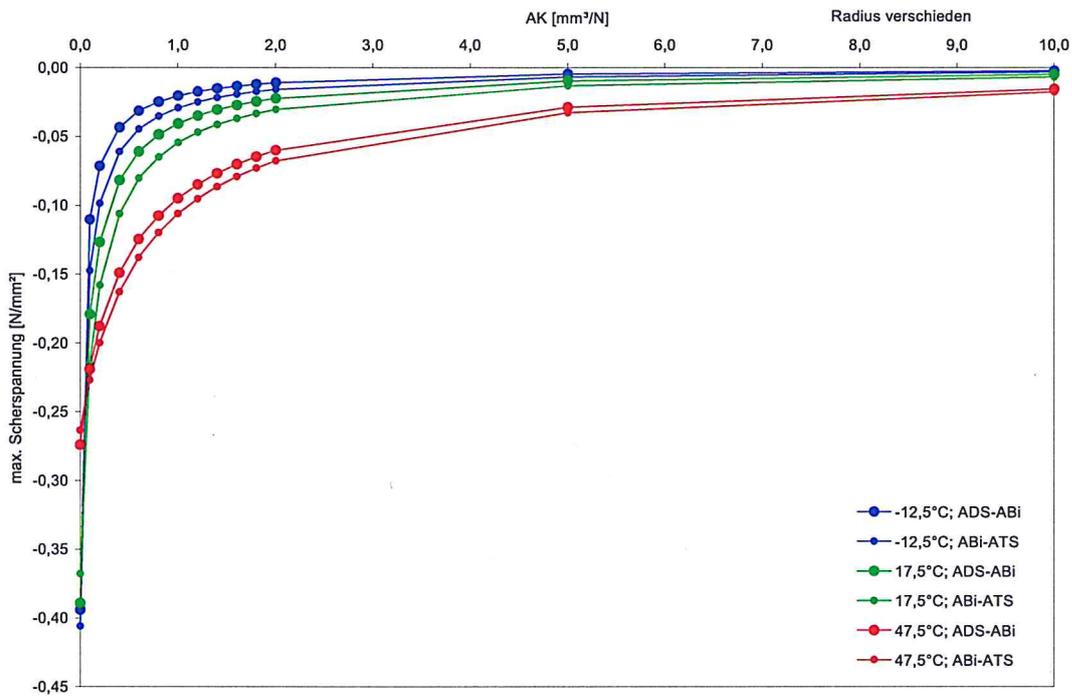


Abbildung 85: Variante 2, Maximale Scherspannungen an den Schichtgrenzen

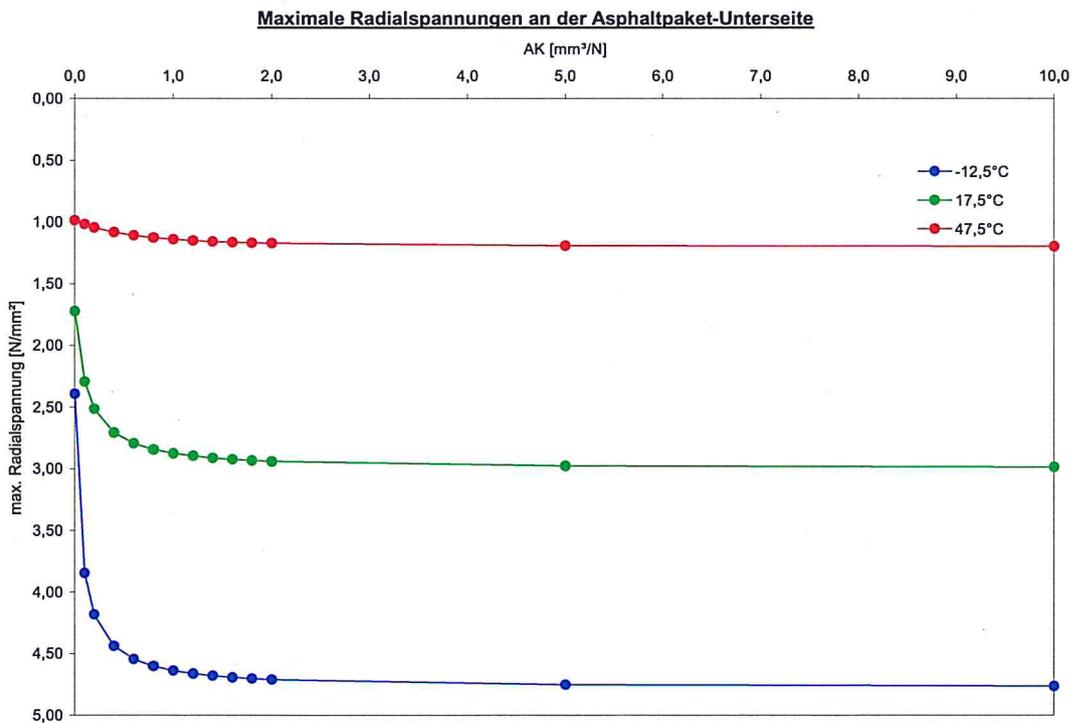


Abbildung 86: Variante 2, Maximale Radialspannungen an der Asphaltpaket-Unterseite

Temperatur [°C]	AK1 [mm³/N]	AK2 [mm³/N]	Position [mm]	Weg [mm]	ADS-ABi			
					Scherspannung [N/mm²]	Vertikalspannung [N/mm²]	Scherkraft [kN]	Normalkraft [kN]
-12,5	0,0	0,0	140	0,000	0,394	-0,389	3,09	-3,06
	0,1	0,1	180	0,011	0,110	-0,057	0,87	-0,45
	0,2	0,2	200	0,014	0,071	-0,012	0,56	-0,09
	0,4	0,4	220	0,017	0,043	-0,001	0,34	-0,01
	0,6	0,6	240	0,019	0,032	0,001	0,25	0,00
	0,8	0,8	240	0,020	0,025	0,000	0,19	0,00
	1,0	1,0	240	0,020	0,020	0,000	0,16	0,00
	1,2	1,2	240	0,021	0,017	0,000	0,14	0,00
	1,4	1,4	240	0,021	0,015	0,000	0,12	0,00
	1,6	1,6	240	0,215	0,013	0,000	0,11	0,00
	1,8	1,8	240	0,022	0,012	-0,001	0,09	0,00
	2,0	2,0	240	0,022	0,011	-0,001	0,09	-0,01
	5,0	5,0	300	0,023	0,005	-0,004	0,04	-0,03
	10,0	10,0	300	0,023	0,002	-0,004	0,02	-0,03
	0,0	10,0	140	0,000	0,485	-0,360	3,81	-2,83
10,0	0,0	500	0,023	0,002	-0,001	0,02	0,00	
17,5	0,0	0,0	140	0,000	0,389	-0,393	3,06	-3,08
	0,1	0,1	160	0,018	0,179	-0,192	1,41	-1,51
	0,2	0,2	160	0,025	0,127	-0,195	1,00	-1,53
	0,4	0,4	160	0,033	0,082	-0,198	0,64	-1,55
	0,6	0,6	160	0,036	0,061	-0,200	0,48	-1,57
	0,8	0,8	180	0,039	0,049	-0,067	0,38	-0,52
	1,0	1,0	180	0,041	0,041	-0,067	0,32	-0,53
	1,2	1,2	180	0,042	0,035	-0,068	0,27	-0,53
	1,4	1,4	180	0,043	0,031	-0,068	0,24	-0,53
	1,6	1,6	180	0,043	0,027	-0,068	0,21	-0,53
	1,8	1,8	180	0,044	0,024	-0,068	0,19	-0,54
	2,0	2,0	180	0,045	0,022	-0,068	0,18	-0,54
	5,0	5,0	180	0,048	0,010	-0,070	0,07	-0,55
	10,0	10,0	180	0,049	0,005	-0,070	0,04	-0,55
	0,0	10,0	140	0,000	0,465	-0,371	3,65	-2,91
10,0	0,0	240	0,046	0,005	0,003	0,04	0,02	
47,5	0,0	0,0	140	0,000	0,274	-0,428	2,15	-3,36
	0,1	0,1	140	0,022	0,219	-0,431	1,72	-3,38
	0,2	0,2	140	0,038	0,188	-0,435	1,48	-3,42
	0,4	0,4	140	0,060	0,149	-0,439	1,17	-3,44
	0,6	0,6	140	0,075	0,125	-0,441	0,98	-3,46
	0,8	0,8	140	0,086	0,108	-0,442	0,85	-3,47
	1,0	1,0	140	0,095	0,095	-0,444	0,74	-3,48
	1,2	1,2	140	0,102	0,085	-0,445	0,67	-3,49
	1,4	1,4	140	0,108	0,077	-0,445	0,60	-3,50
	1,6	1,6	140	0,112	0,070	-0,446	0,55	-3,50
	1,8	1,8	140	0,117	0,065	-0,447	0,51	-3,51
	2,0	2,0	140	0,120	0,060	-0,447	0,47	-3,51
	5,0	5,0	140	0,145	0,029	-0,451	0,23	-3,54
	10,0	10,0	140	0,157	0,016	-0,452	0,12	-3,55
	0,0	10,0	140	0,000	0,275	-0,426	2,16	-3,35
10,0	0,0	160	0,170	0,017	-0,209	0,13	-1,64	

Tabelle 17: Variante 2, ADS-ABi, Maximale Scherspannungen

Temperatur [°C]	AK1 [mm³/N]	AK2 [mm³/N]	Position [mm]	Weg [mm]	ABi-ATS			
					Scherspannung [N/mm²]	Vertikalspannung [N/mm²]	Scherkraft [kN]	Normalkraft [kN]
-12,5	0,0	0,0	180	0,000	0,406	-0,137	3,19	-1,08
	0,1	0,1	200	0,015	0,148	-0,016	1,16	-0,13
	0,2	0,2	220	0,020	0,099	0,000	0,77	0,00
	0,4	0,4	240	0,024	0,061	0,002	0,48	0,01
	0,6	0,6	240	0,027	0,045	-0,001	0,35	-0,01
	0,8	0,8	240	0,028	0,035	-0,002	0,28	-0,02
	1,0	1,0	240	0,029	0,029	-0,003	0,23	-0,02
	1,2	1,2	240	0,030	0,025	-0,004	0,20	-0,03
	1,4	1,4	240	0,030	0,022	-0,004	0,17	-0,03
	1,6	1,6	240	0,031	0,019	-0,005	0,15	-0,04
	1,8	1,8	300	0,031	0,017	-0,006	0,14	-0,05
	2,0	2,0	300	0,032	0,016	-0,006	0,12	-0,05
	5,0	5,0	300	0,033	0,007	-0,008	0,05	-0,06
	10,0	10,0	300	0,034	0,003	-0,008	0,03	-0,06
	0,0	10,0	300	0,033	0,003	-0,018	0,03	-0,14
10,0	0,0	140	0,000	0,477	-0,306	3,74	-2,40	
17,5	0,0	0,0	160	0,000	0,368	-0,152	2,89	-1,20
	0,1	0,1	160	0,022	0,215	-0,166	1,69	-1,30
	0,2	0,2	160	0,032	0,158	-0,177	1,24	-1,39
	0,4	0,4	180	0,042	0,106	-0,095	0,83	-0,74
	0,6	0,6	180	0,048	0,080	-0,100	0,63	-0,78
	0,8	0,8	180	0,052	0,065	-0,103	0,51	-0,81
	1,0	1,0	180	0,054	0,054	-0,105	0,43	-0,83
	1,2	1,2	180	0,056	0,047	-0,107	0,37	-0,84
	1,4	1,4	200	0,058	0,041	-0,050	0,32	-0,39
	1,6	1,6	200	0,059	0,037	-0,051	0,29	-0,40
	1,8	1,8	200	0,060	0,033	-0,052	0,26	-0,41
	2,0	2,0	200	0,061	0,030	-0,052	0,24	-0,41
	5,0	5,0	200	0,066	0,013	-0,056	0,10	-0,44
	10,0	10,0	200	0,068	0,007	-0,057	0,05	-0,45
	0,0	10,0	220	0,065	0,006	-0,052	0,05	-0,41
10,0	0,0	140	0,000	0,433	-0,314	3,40	-2,46	
47,5	0,0	0,0	140	0,000	0,264	-0,306	2,07	-2,40
	0,1	0,1	140	0,023	0,227	-0,319	1,78	-2,51
	0,2	0,2	140	0,040	0,200	-0,328	1,57	-2,57
	0,4	0,4	140	0,065	0,163	-0,339	1,28	-2,66
	0,6	0,6	140	0,083	0,138	-0,347	1,08	-2,72
	0,8	0,8	140	0,096	0,120	-0,353	0,94	-2,77
	1,0	1,0	140	0,106	0,106	-0,357	0,83	-2,80
	1,2	1,2	140	0,114	0,095	-0,360	0,75	-2,83
	1,4	1,4	140	0,121	0,086	-0,363	0,68	-2,85
	1,6	1,6	140	0,127	0,079	-0,366	0,62	-2,87
	1,8	1,8	140	0,131	0,073	-0,368	0,57	-2,89
	2,0	2,0	140	0,136	0,068	-0,369	0,53	-2,90
	5,0	5,0	160	0,165	0,033	-0,236	0,26	-1,86
	10,0	10,0	160	0,178	0,018	-0,240	0,14	-1,88
	0,0	10,0	160	0,184	0,108	-0,235	0,85	-1,85
10,0	0,0	140	0,000	0,275	-0,364	2,16	-2,86	

Tabelle 18: Variante2, ABi-ATS, Maximale Scherspannungen

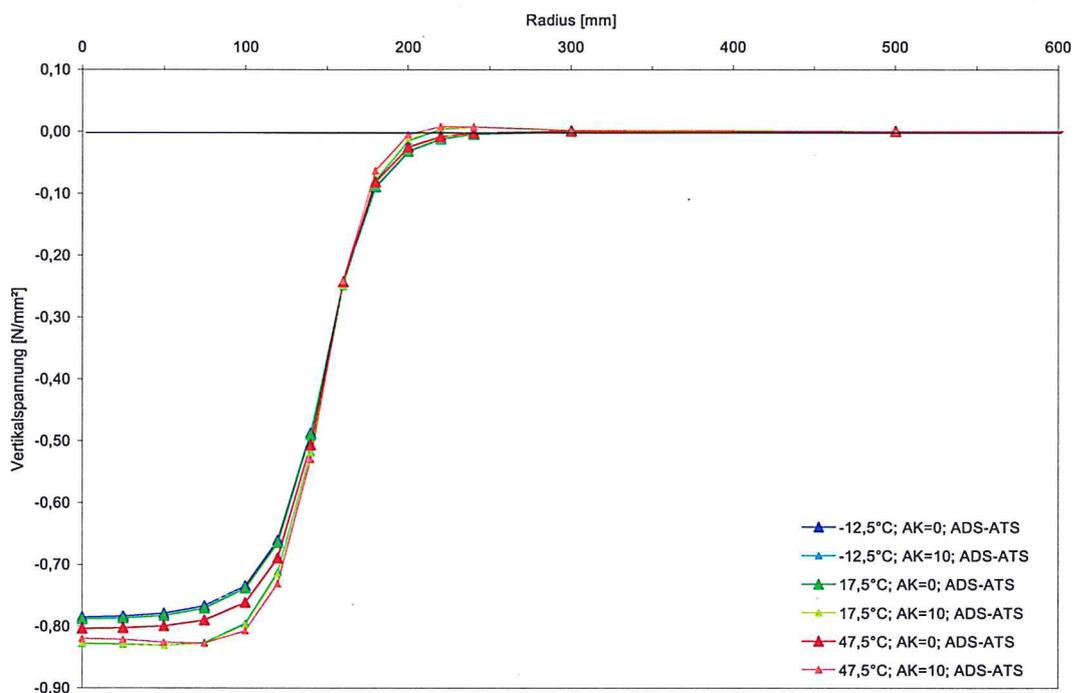


Abbildung 87: Variante 3, Vertikalspannungen an der Schichtgrenze

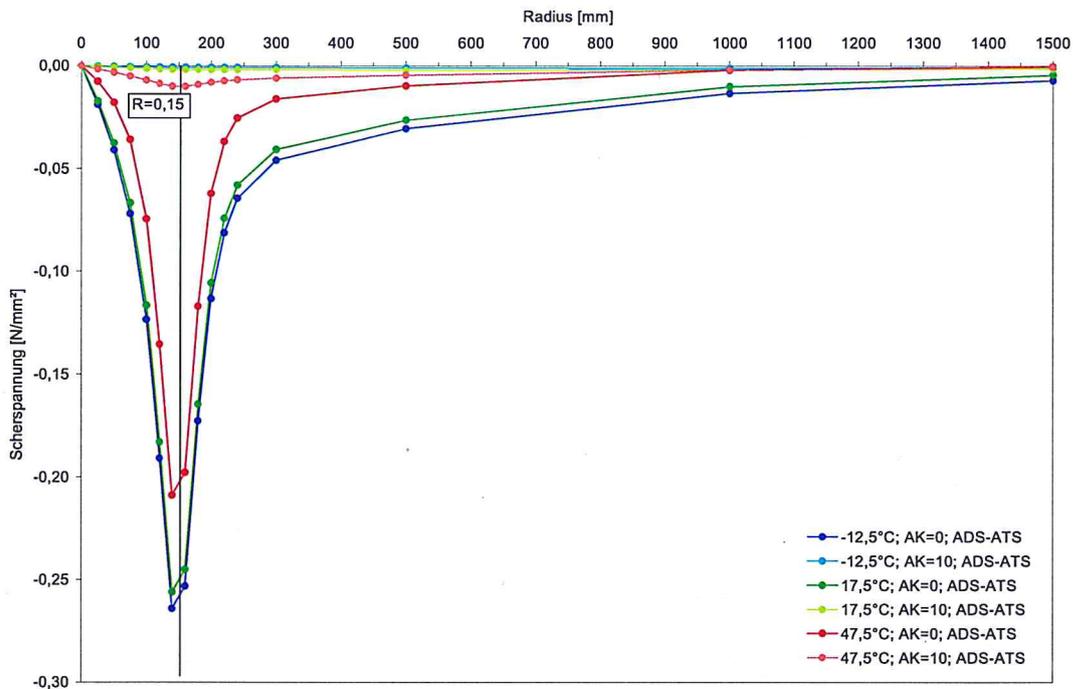


Abbildung 88: Variante 3, Scherspannungen an der Schichtgrenze

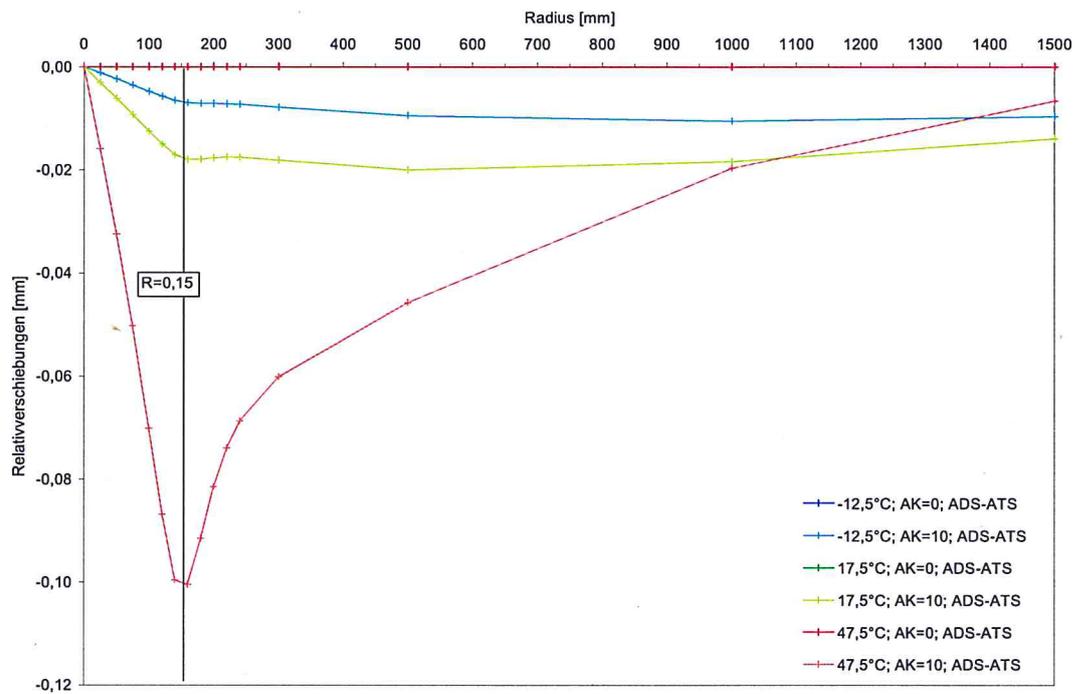


Abbildung 89: Variante 3, Relativverschiebungen an der Schichtgrenze

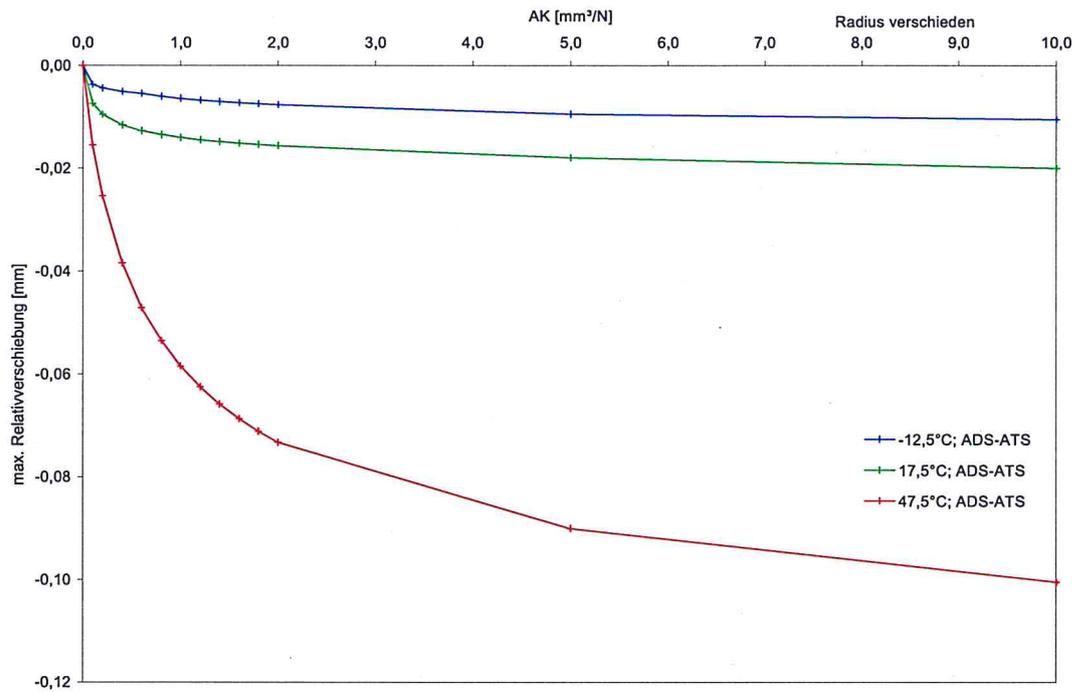


Abbildung 90: Variante 3, Maximale Relativverschiebungen an der Schichtgrenze

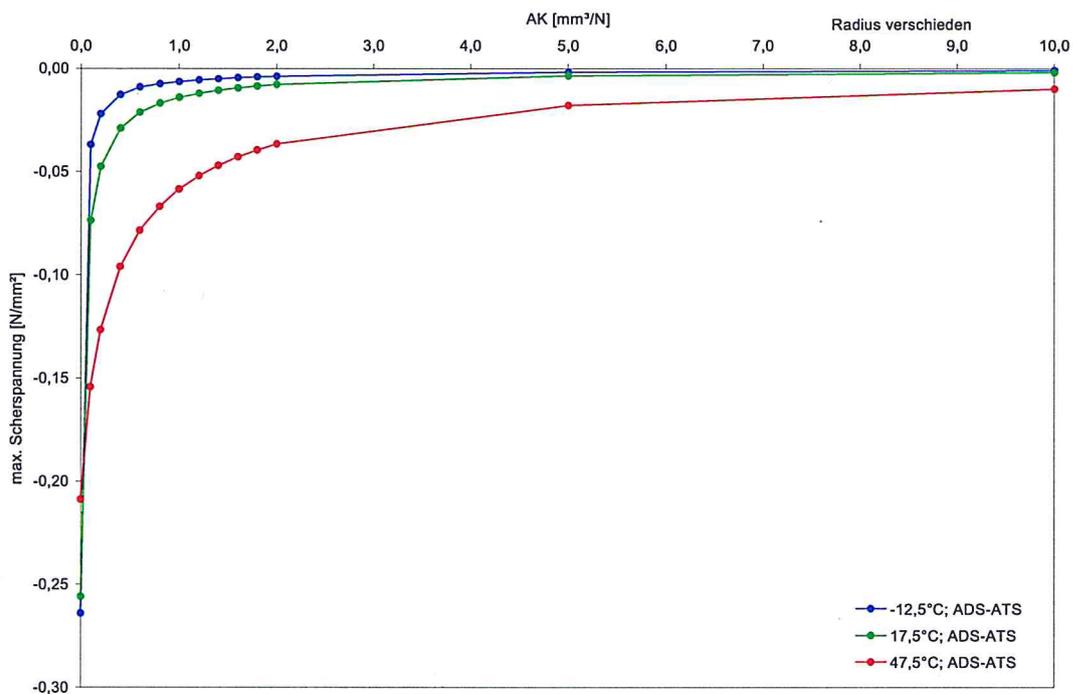


Abbildung 91: Variante 3, Maximale Scherspannungen an der Schichtgrenze

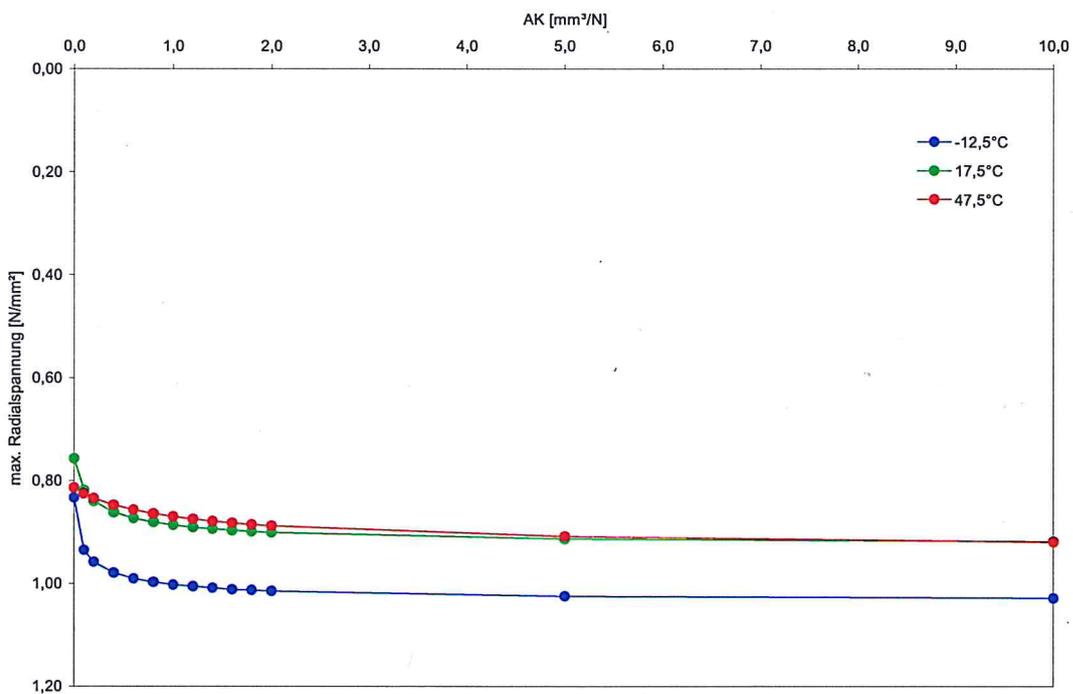


Abbildung 92: Variante 3, Maximale Radialspannungen an der Asphaltpaket-Unterseite

Temperatur [°C]	AK [mm³/N]	Position [mm]	Weg [mm]	ADS-ATS			
				Scherspannung [N/mm²]	Normalspannung [N/mm²]	Scherkraft [kN]	Normalkraft [kN]
-12,5	0,0	140	0,000	0,264	-0,487	2,07	-3,82
	0,1	160	0,004	0,037	-0,245	0,29	-1,93
	0,2	160	0,004	0,022	-0,247	0,17	-1,94
	0,4	160	0,005	0,013	-0,248	0,10	-1,95
	0,6	300	0,005	0,009	0,003	0,07	0,02
	0,8	500	0,006	0,007	0,000	0,06	0,00
	1,0	500	0,006	0,006	0,000	0,05	0,00
	1,2	500	0,007	0,006	0,000	0,04	0,00
	1,4	500	0,007	0,005	0,000	0,04	0,00
	1,6	500	0,007	0,005	0,000	0,04	0,00
	1,8	500	0,007	0,004	0,000	0,03	0,00
	2,0	500	0,008	0,004	0,000	0,03	0,00
	5,0	1000	0,009	0,002	0,000	0,01	0,00
10,0	1000	0,010	0,001	0,000	0,01	0,00	
17,5	0,0	140	0,000	0,256	-0,490	2,01	-3,84
	0,1	140	0,007	0,074	-0,508	0,58	-3,99
	0,2	160	0,009	0,047	-0,244	0,37	-1,92
	0,4	160	0,012	0,029	-0,246	0,23	-1,93
	0,6	160	0,013	0,021	-0,246	0,17	-1,94
	0,8	160	0,013	0,017	-0,247	0,13	-1,94
	1,0	160	0,014	0,014	-0,247	0,11	-1,94
	1,2	160	0,014	0,012	-0,247	0,09	-1,94
	1,4	160	0,015	0,011	-0,248	0,08	-1,94
	1,6	160	0,015	0,009	-0,248	0,07	-1,95
	1,8	160	0,015	0,009	-0,248	0,07	-1,95
	2,0	160	0,016	0,008	-0,248	0,06	-1,95
	5,0	160	0,017	0,003	-0,249	0,03	-1,95
10,0	160	0,018	0,002	-0,249	0,01	-1,95	
47,5	0,0	140	0,000	0,209	-0,507	1,64	-3,98
	0,1	140	0,015	0,154	-0,513	1,21	-4,03
	0,2	140	0,025	0,127	-0,516	1,00	-4,05
	0,4	140	0,038	0,096	-0,520	0,75	-4,08
	0,6	140	0,047	0,079	-0,521	0,62	-4,10
	0,8	140	0,053	0,067	-0,523	0,53	-4,11
	1,0	140	0,058	0,058	-0,524	0,46	-4,11
	1,2	140	0,062	0,052	-0,525	0,41	-4,12
	1,4	140	0,066	0,047	-0,525	0,37	-4,12
	1,6	140	0,069	0,043	-0,526	0,34	-4,13
	1,8	140	0,071	0,040	-0,526	0,31	-4,13
	2,0	140	0,073	0,037	-0,526	0,29	-4,13
	5,0	160	0,090	0,018	-0,240	0,14	-1,89
10,0	160	0,100	0,010	-0,241	0,08	-1,89	

Tabelle 19: Variante 3, Maximale Scherspannungen

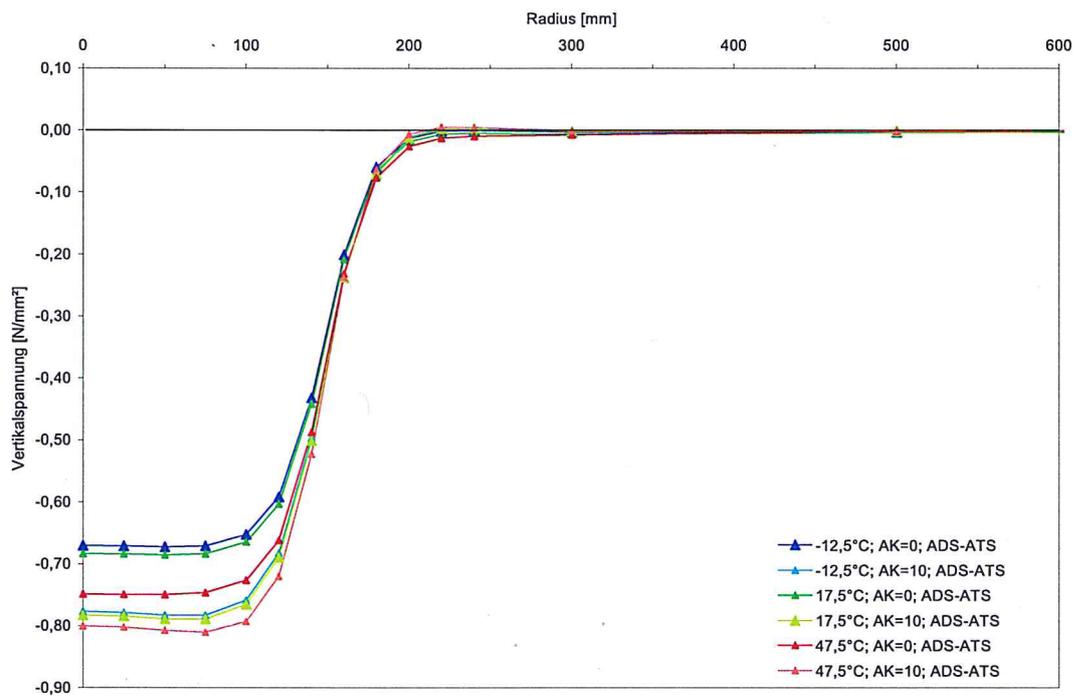


Abbildung 93: Variante 4, Vertikalspannungen an der Schichtgrenze

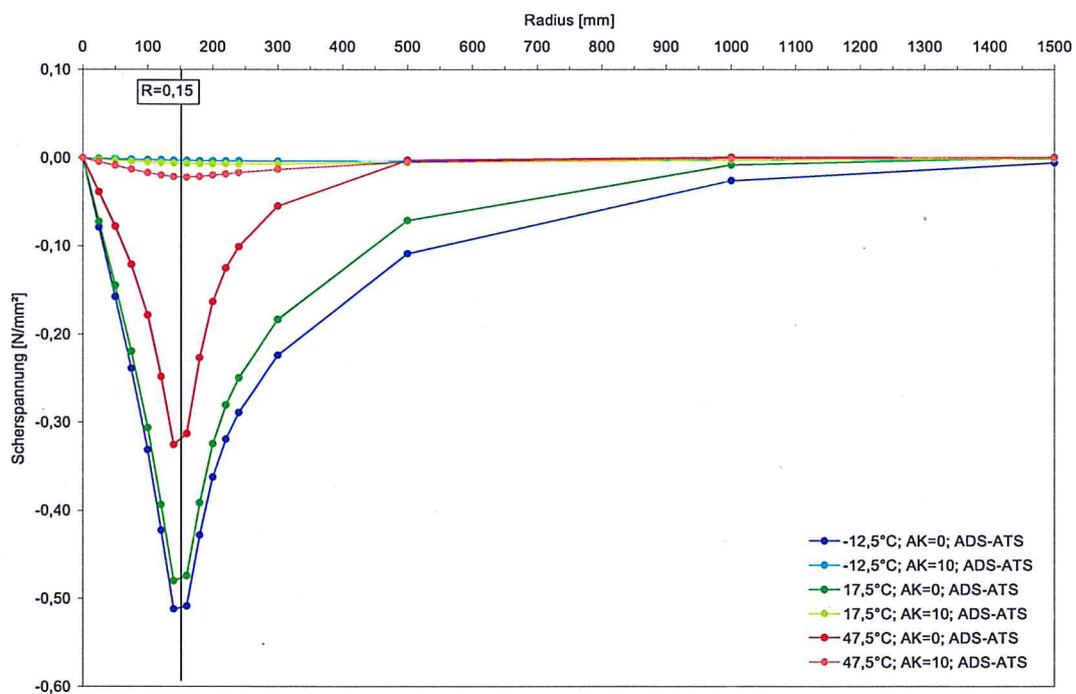


Abbildung 94: Variante 4, Scherspannungen an der Schichtgrenze

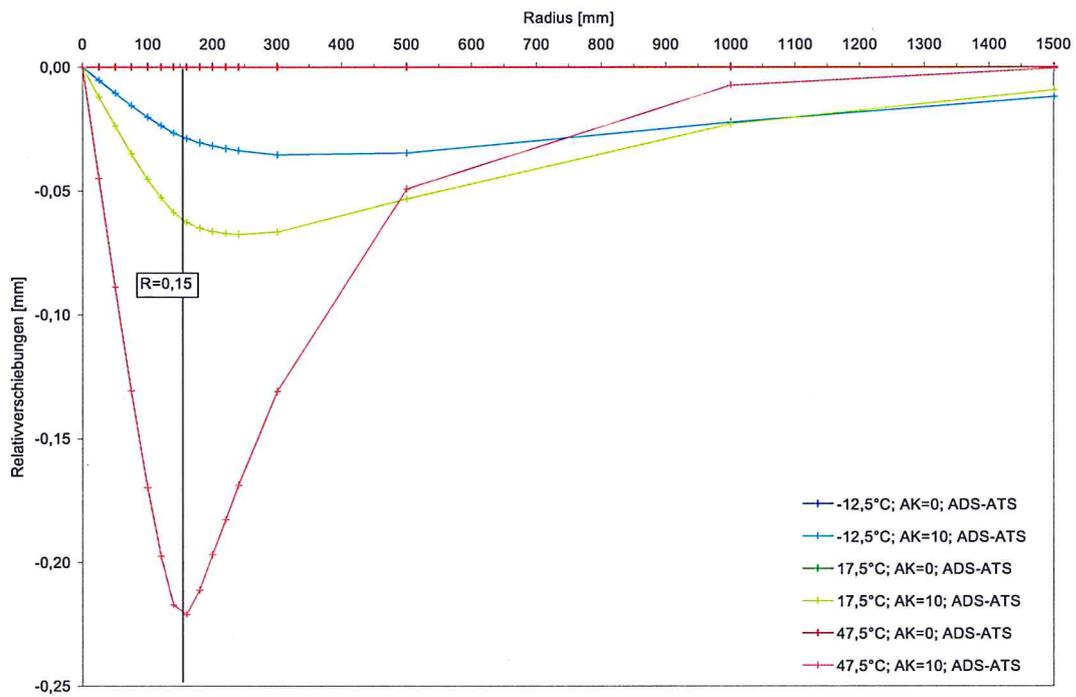


Abbildung 95: Variante 4, Relativverschiebungen an der Schichtgrenze

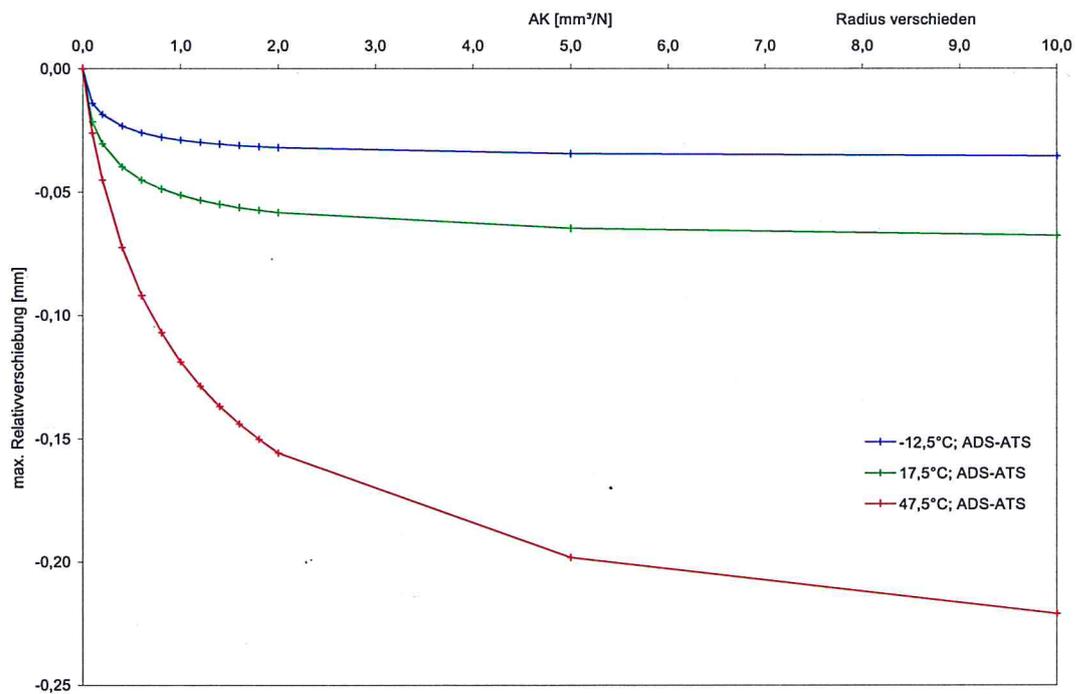


Abbildung 96: Variante 4, Maximale Relativverschiebungen an der Schichtgrenze

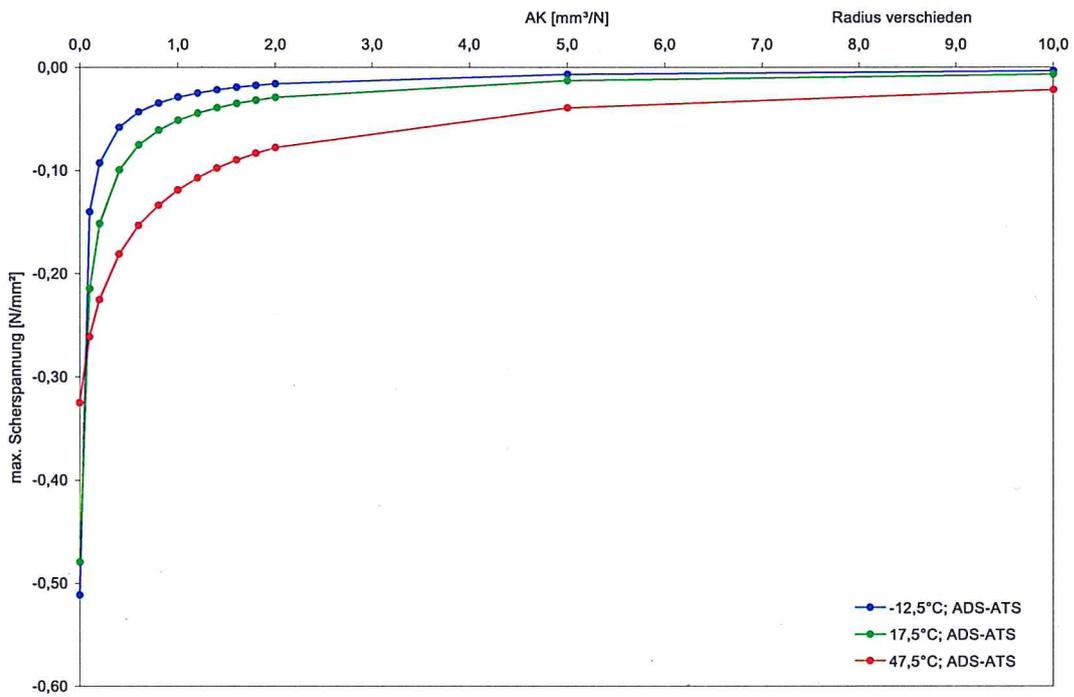


Abbildung 97: Variante 4, Maximale Scherspannungen an der Schichtgrenze

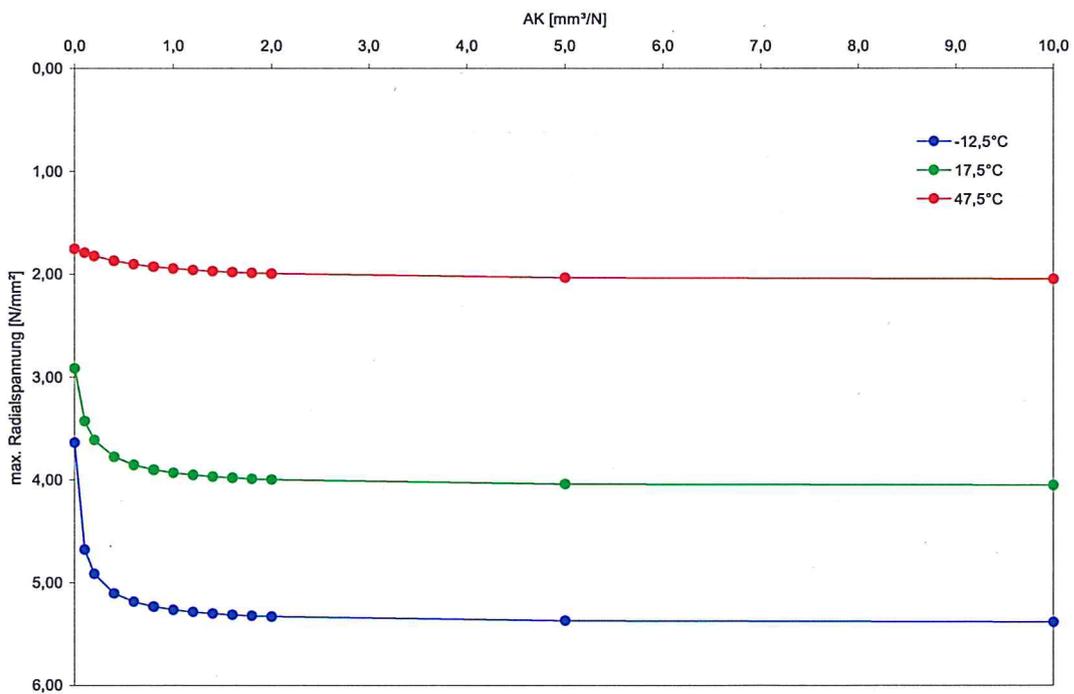


Abbildung 98: Variante 4, Maximale Radialspannungen an der Asphaltpaket-Unterseite

Temperatur [°C]	AK [mm³/N]	Position [mm]	Weg [mm]	ADS-ATS			
				Scherspannung [N/mm²]	Normalspannung [N/mm²]	Scherkraft [kN]	Normalkraft [kN]
-12,5	0,0	140	0,000	0,512	-0,432	4,02	-3,39
	0,1	200	0,014	0,140	0,000	1,10	0,00
	0,2	220	0,019	0,093	0,001	0,73	0,01
	0,4	240	0,023	0,058	0,009	0,46	0,07
	0,6	300	0,026	0,043	0,001	0,34	0,01
	0,8	300	0,028	0,035	0,001	0,27	0,01
	1,0	300	0,029	0,029	0,001	0,23	0,00
	1,2	300	0,030	0,025	0,000	0,20	0,00
	1,4	300	0,031	0,022	0,000	0,17	0,00
	1,6	300	0,031	0,019	0,000	0,15	0,00
	1,8	300	0,036	0,018	0,000	0,14	0,00
	2,0	300	0,032	0,016	0,000	0,13	0,00
	5,0	300	0,034	0,007	0,007	-0,001	0,05
10,0	300	0,035	0,004	0,004	-0,001	0,03	-0,01
17,5	0,0	140	0,000	0,479	-0,442	3,76	-3,47
	0,1	160	0,021	0,215	-0,214	1,68	-1,68
	0,2	160	0,030	0,151	-0,219	1,19	-1,72
	0,4	180	0,040	0,099	-0,062	0,78	-0,49
	0,6	180	0,045	0,075	-0,064	0,59	-0,50
	0,8	200	0,049	0,061	-0,008	0,48	-0,06
	1,0	200	0,051	0,051	-0,008	0,40	-0,06
	1,2	200	0,053	0,044	-0,009	0,35	-0,07
	1,4	220	0,055	0,039	0,005	0,31	0,04
	1,6	220	0,056	0,035	0,005	0,28	0,04
	1,8	220	0,057	0,032	0,004	0,25	0,04
	2,0	220	0,058	0,029	0,004	0,23	0,03
	5,0	240	0,065	0,013	0,013	0,004	0,10
10,0	240	0,067	0,007	0,007	0,003	0,05	0,03
47,5	0,0	140	0,000	0,325	-0,488	2,55	-3,83
	0,1	140	0,026	0,261	-0,495	2,05	-3,88
	0,2	140	0,045	0,225	-0,488	1,77	-3,84
	0,4	140	0,072	0,181	-0,503	1,42	-3,95
	0,6	140	0,092	0,153	-0,506	1,20	-3,97
	0,8	140	0,107	0,134	-0,508	1,05	-3,99
	1,0	140	0,119	0,119	-0,510	0,93	-4,01
	1,2	140	0,129	0,107	-0,511	0,84	-4,02
	1,4	140	0,137	0,098	-0,513	0,77	-4,03
	1,6	140	0,144	0,090	-0,514	0,71	-4,03
	1,8	160	0,150	0,083	-0,233	0,66	-1,83
	2,0	160	0,156	0,078	-0,233	0,61	-1,83
	5,0	160	0,198	0,040	0,040	-0,236	0,31
10,0	160	0,221	0,022	0,022	-0,238	0,17	-1,87

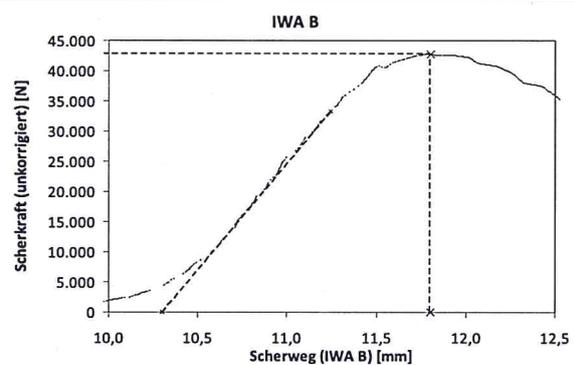
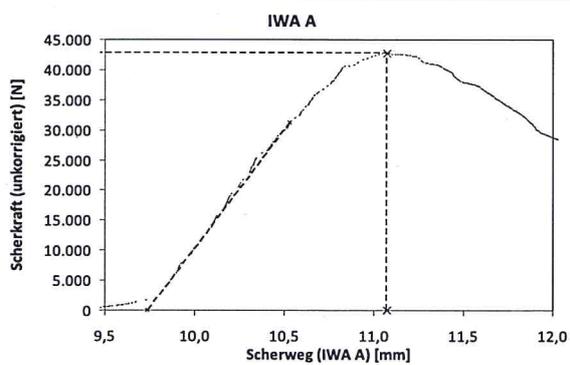
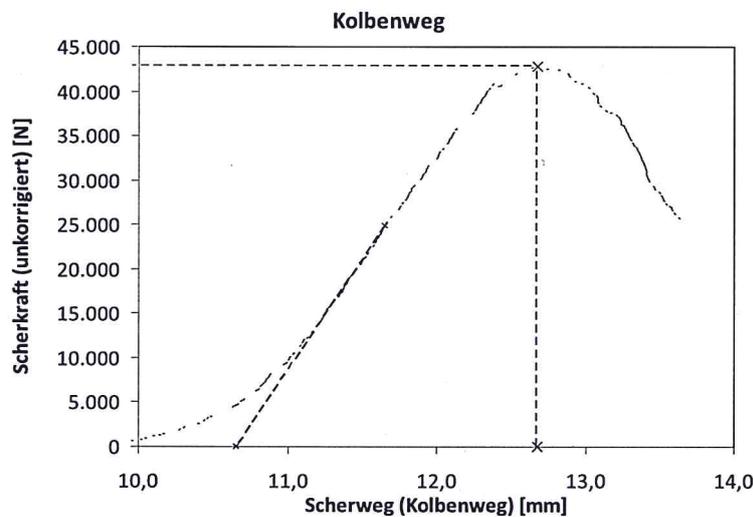
Tabelle 20: Variante 4, Maximale Scherspannungen

Probekörper: PK 1A**Versuchsdaten**

Material:	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S
Haftvermittlerart:	ohne
Haftvermittlermenge:	0 g/m ²
PK-Durchmesser:	153,45 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	44,18 kN
korr. Scherkraft	42,22 kN
Korrekturfaktor:	0,956
Scherweg (Kolbenweg):	1,963 mm
Scherweg (IWA A):	0,828 mm
Scherweg (IWA B):	1,190 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,009 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	13,15 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	5,54 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	7,97 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	6,76 mm ³ /N

**Tabelle 21: Prüfergebnisse PK 1A**

Probekörper: PK 2A**Versuchsdaten**

Material: SMA 0/8 S - ABI 0/16 S
 Haftvermittlerart: U 60 K
 Haftvermittlermenge: 150 g/m²
 PK-Durchmesser: 153,52 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 42,77 kN
 korr. Scherkraft: 40,83 kN
 Korrekturfaktor: 0,955
 Scherweg (Kolbenweg): 2,026 mm
 Scherweg (IWA A): 1,331 mm
 Scherweg (IWA B): 1,500 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 1,416 mm
 V-Faktor (Kolbenweg) 14,03 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 9,22 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 10,39 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B) 9,80 mm³/N

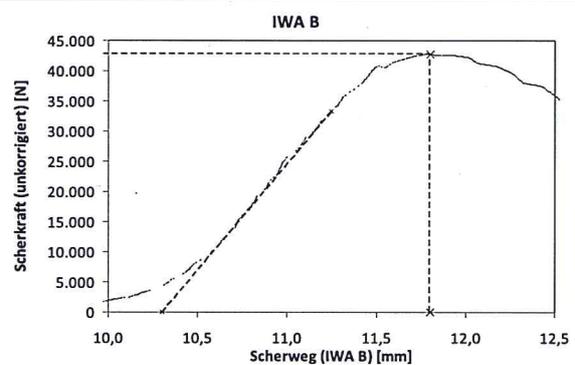
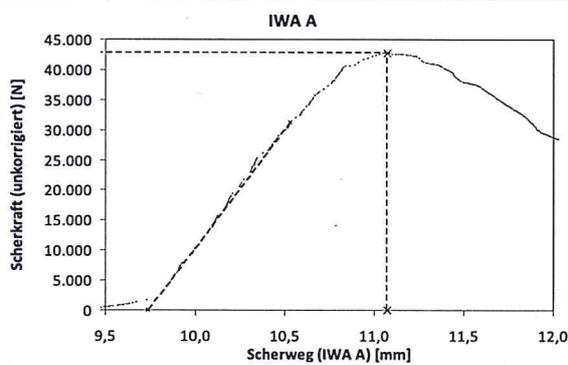
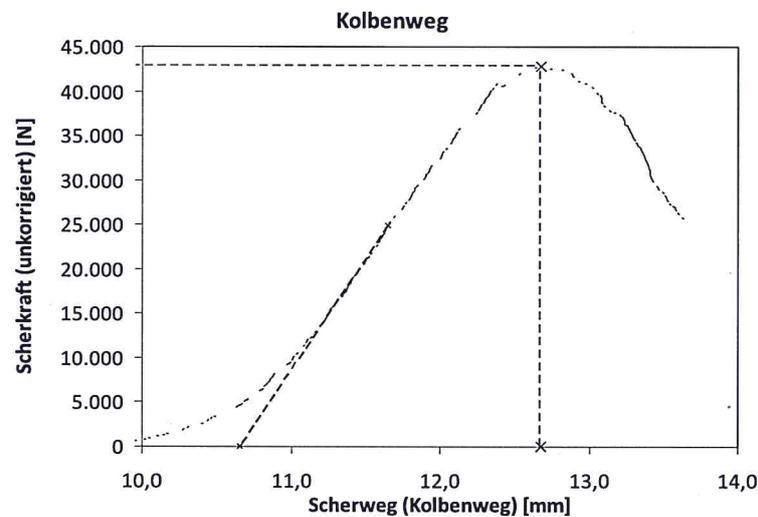


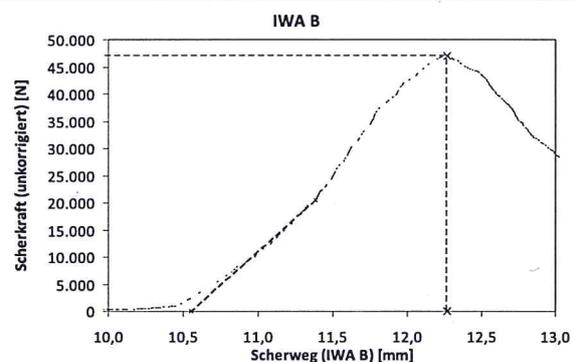
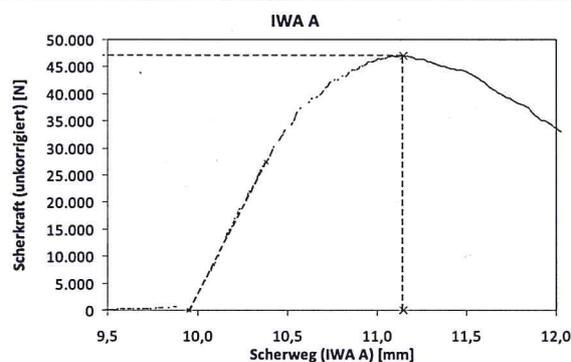
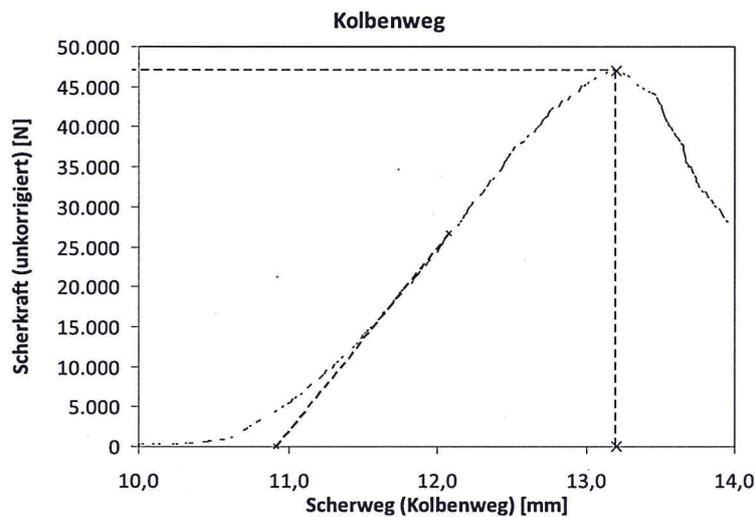
Tabelle 22: Prüfergebnisse PK 2A

Probekörper: PK 3A**Versuchsdaten**

Material:	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S
Haftvermittlerart:	U 60 K
Haftvermittlermenge:	250 g/m ²
PK-Durchmesser:	153,36 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	46,92 kN
korr. Scherkraft	44,88 kN
Korrekturfaktor:	0,957
Scherweg (Kolbenweg):	2,290 mm
Scherweg (IWA A):	1,196 mm
Scherweg (IWA B):	1,720 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,458 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	14,43 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	7,54 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	10,83 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	9,18 mm ³ /N

**Tabelle 23: Prüfergebnisse PK 3A**

Probekörper: PK 4A**Versuchsdaten**

Material:	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S
Haftvermittlerart:	U 60 K
Haftvermittlermenge:	350 g/m ²
PK-Durchmesser:	153,37 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	39,08 kN
korr. Scherkraft	37,38 kN
Korrekturfaktor:	0,957
Scherweg (Kolbenweg):	2,220 mm
Scherweg (IWA A):	1,208 mm
Scherweg (IWA B):	1,560 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,384 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	16,79 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	9,14 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	11,80 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	10,47 mm ³ /N

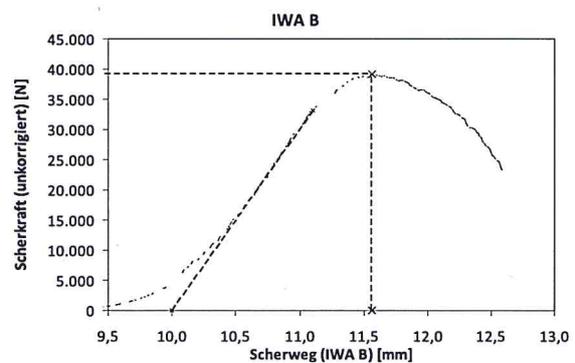
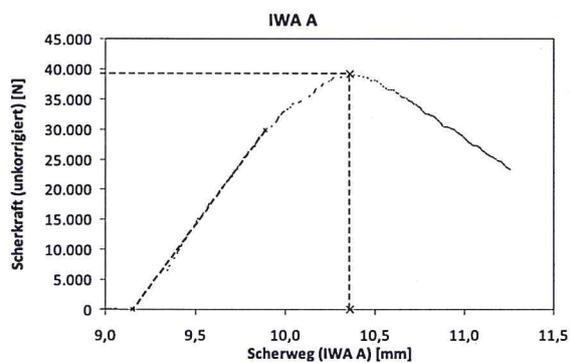
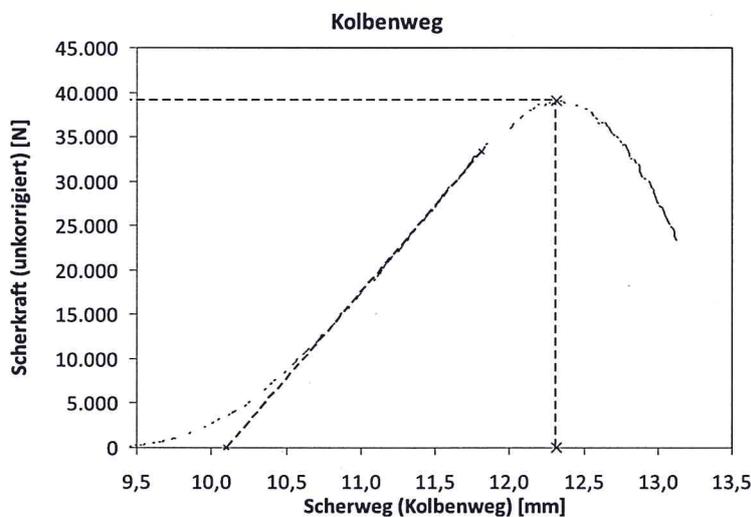


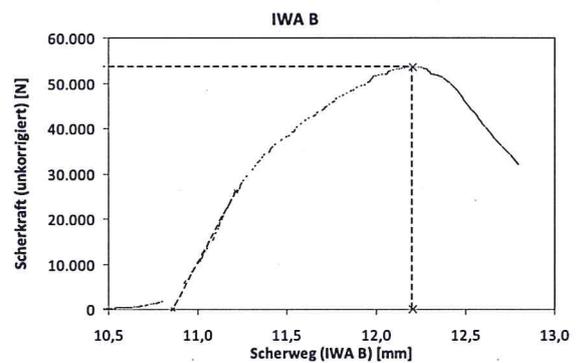
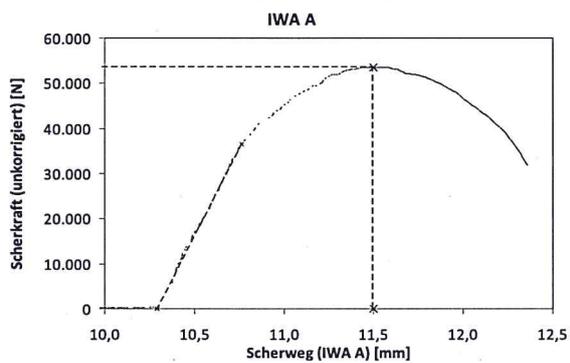
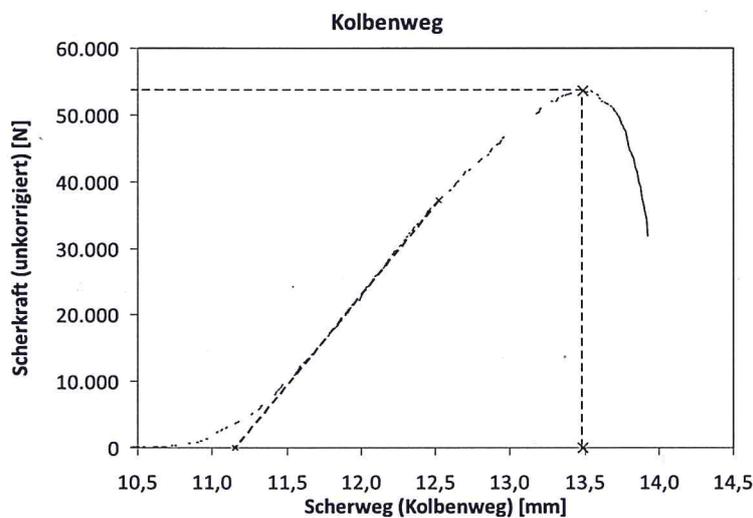
Tabelle 24: Prüfergebnisse PK 4A

Probekörper: PK 5A**Versuchsdaten**

Material: SMA 0/8 S - ABI 0/16 S
 Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2
 Haftvermittlermenge: 150 g/m²
 PK-Durchmesser: 153,48 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 53,55 kN
 korr. Scherkraft: 51,14 kN
 Korrekturfaktor: 0,955
 Scherweg (Kolbenweg): 2,340 mm
 Scherweg (IWA A): 1,209 mm
 Scherweg (IWA B): 1,348 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 1,279 mm
 V-Faktor (Kolbenweg) 12,94 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 6,69 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 7,45 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B) 7,07 mm³/N

**Tabelle 25: Prüfergebnisse PK 5A**

Probekörper: PK 6A**Versuchsdaten**

Material:	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S
Haftvermittlerart:	PmOB U 60 K Art C2
Haftvermittlermenge:	250 g/m ²
PK-Durchmesser:	153,38 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	50,45 kN
korr. Scherkraft	48,25 kN
Korrekturfaktor:	0,956
Scherweg (Kolbenweg):	2,316 mm
Scherweg (IWA A):	1,125 mm
Scherweg (IWA B):	1,558 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,341 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	13,57 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	6,59 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	9,13 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	7,86 mm ³ /N

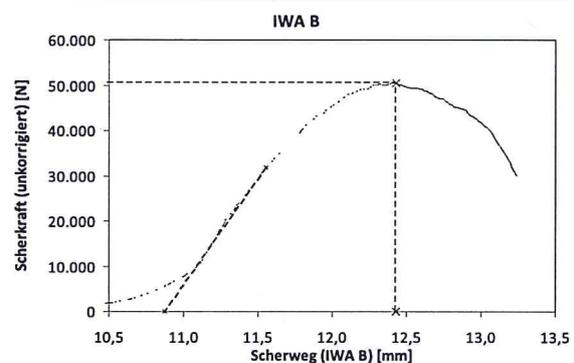
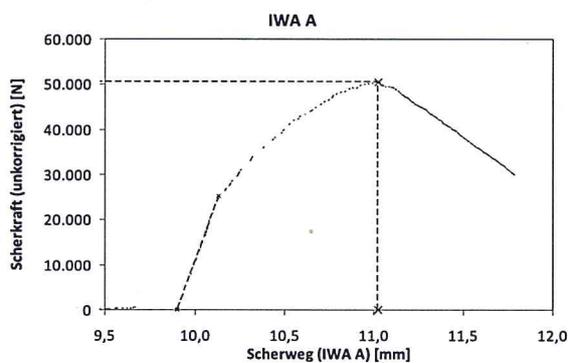
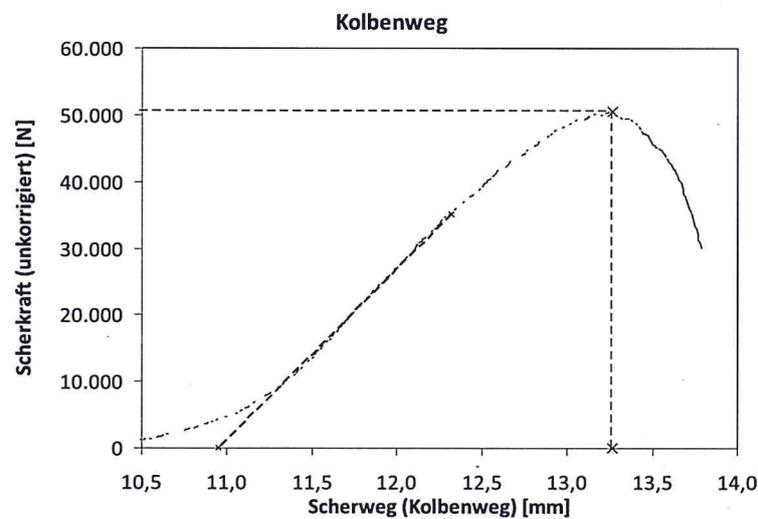


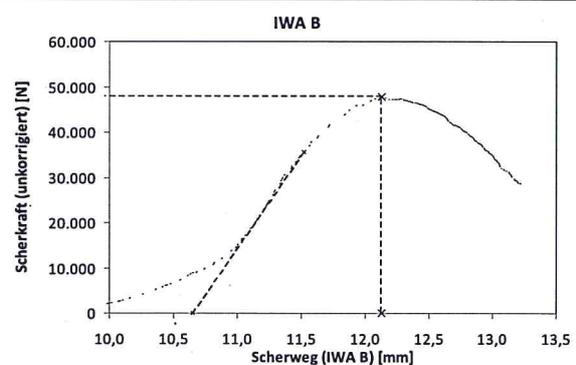
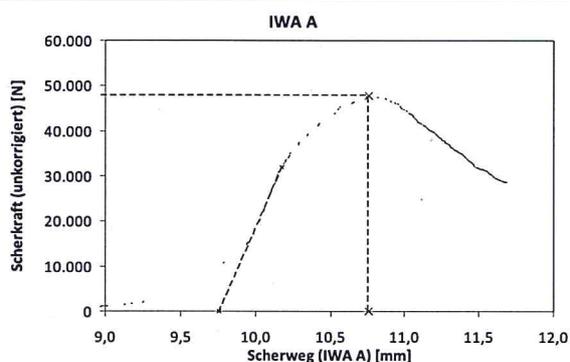
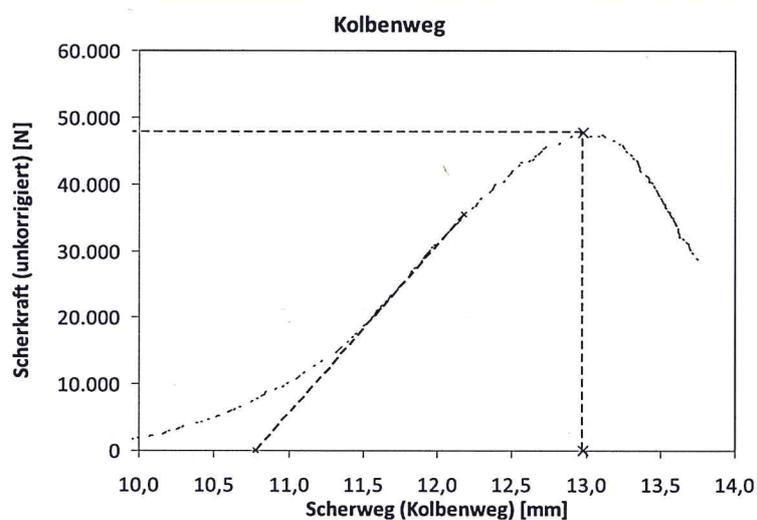
Tabelle 26: Prüfergebnisse PK 6A

Probekörper: PK 8A**Versuchsdaten**

Material:	SMA 0/8 S - ABi 0/16 S
Haftvermittlerart:	PmOB U 60 K Art C2
Haftvermittlermenge:	350 g/m ²
PK-Durchmesser:	153,12 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	47,75 kN
korr. Scherkraft	45,83 kN
Korrekturfaktor:	0,960
Scherweg (Kolbenweg):	2,200 mm
Scherweg (IWA A):	0,996 mm
Scherweg (IWA B):	1,481 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,239 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	13,57 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	6,15 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	9,14 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	7,64 mm ³ /N

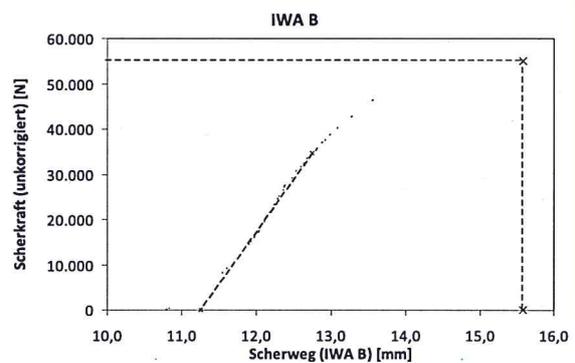
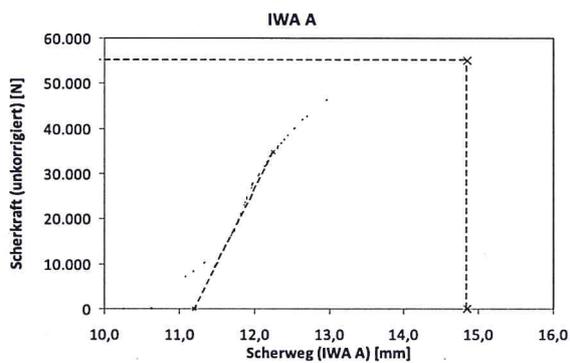
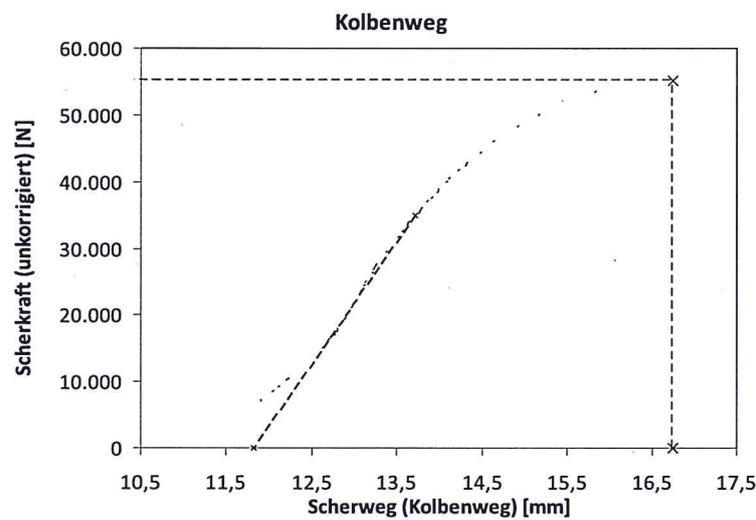
**Tabelle 27: Prüfergebnisse PK 8A**

Probekörper: PK 11A**Versuchsdaten**

Material:	SMA 0/8 S
Haftvermittlerart:	monolithisch
Haftvermittlermenge:	0 g/m ²
PK-Durchmesser:	152,40 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	55,09 kN
korr. Scherkraft	53,37 kN
Korrekturfaktor:	0,969
Scherweg (Kolbenweg):	4,931 mm
Scherweg (IWA A):	3,650 mm
Scherweg (IWA B):	4,326 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	3,988 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	26,12 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	19,34 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	22,92 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	21,13 mm ³ /N

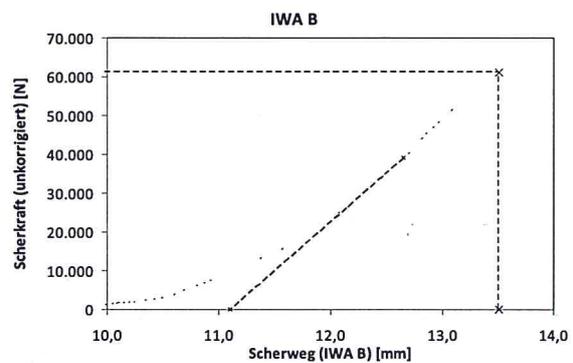
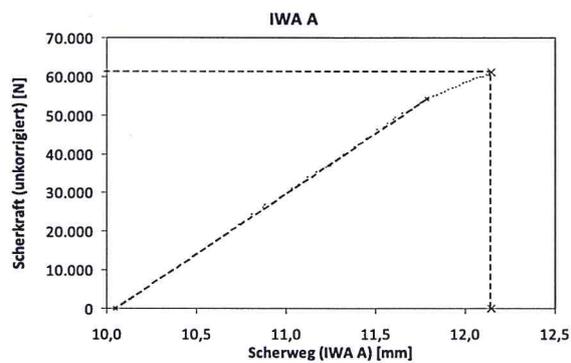
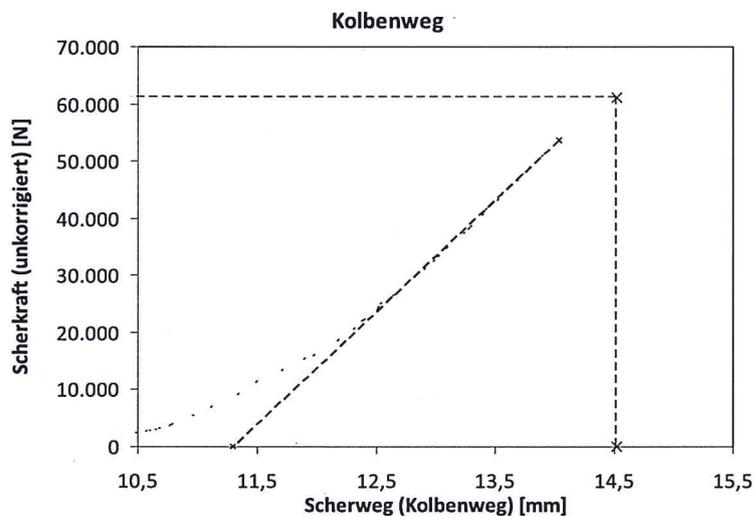
**Tabelle 28: Prüfergebnisse PK 11A**

Probekörper: PK 12A**Versuchsdaten**

Material: ABi 0/16 S
 Haftvermittlerart: monolithisch
 Haftvermittlermenge: 0 g/m²
 PK-Durchmesser: 152,47 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 61,05 kN Abbruch wegen Maxiamalkraftüberschreitung !
 korr. Scherkraft 59,09 kN
 Korrekturfaktor: 0,968
 Scherweg (Kolbenweg): --- mm
 Scherweg (IWA A): --- mm
 Scherweg (IWA B): --- mm
 MW Scherweg (IWA A&B): --- mm
 V-Faktor (Kolbenweg) --- mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) --- mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) --- mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B) --- mm³/N

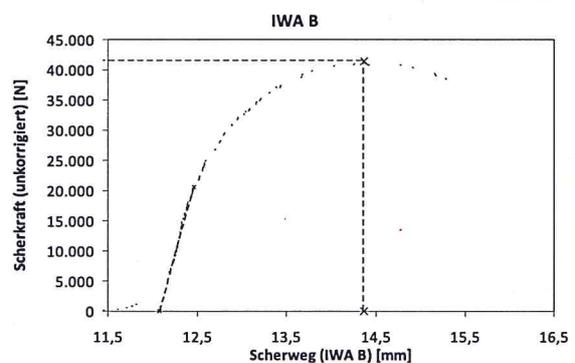
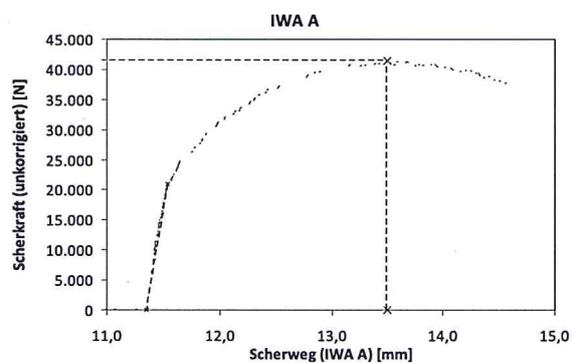
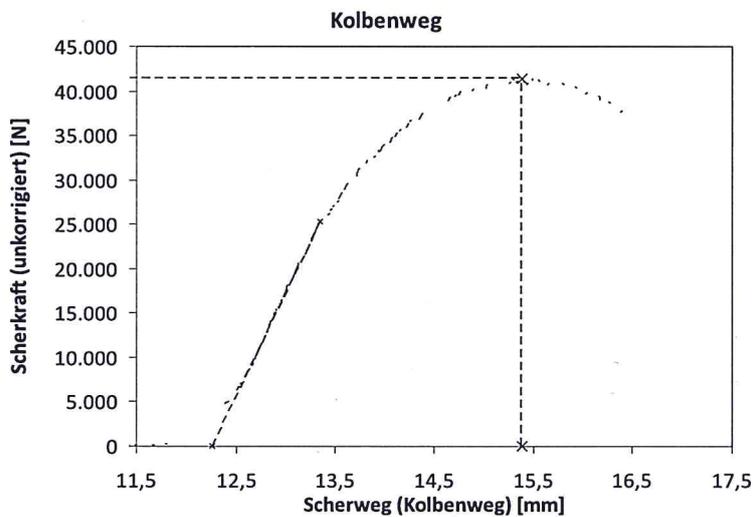
**Tabelle 29: Prüfergebnisse PK 12A**

Probekörper: PK 13A**Versuchsdaten**

Material:	ATS 0/22CS
Haftvermittlerart:	monolithisch
Haftvermittlermenge:	0 g/m ²
PK-Durchmesser:	152,47 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	41,39 kN
korr. Scherkraft	40,06 kN
Korrekturfaktor:	0,968
Scherweg (Kolbenweg):	3,130 mm
Scherweg (IWA A):	2,155 mm
Scherweg (IWA B):	2,296 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	2,225 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	22,09 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	15,21 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	16,20 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	15,71 mm ³ /N

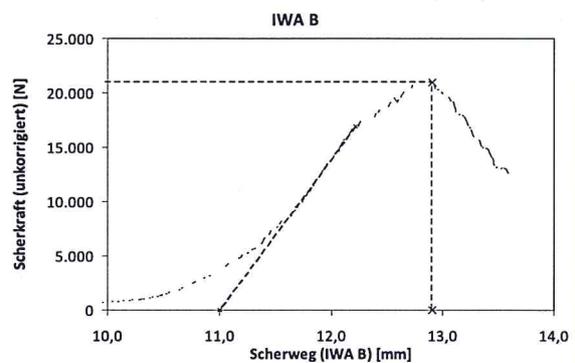
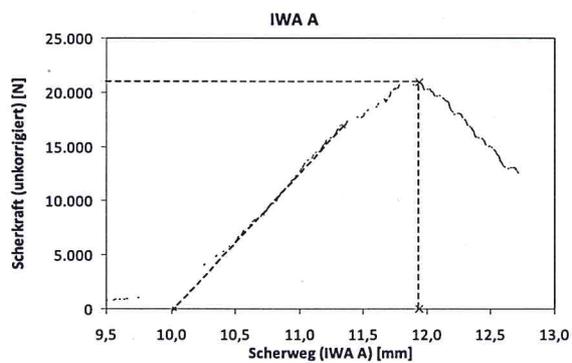
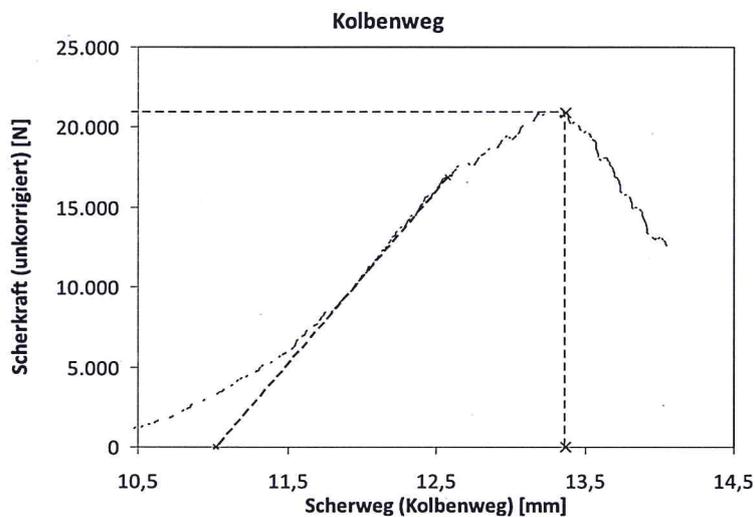
**Tabelle 30: Prüfergebnisse PK 13A**

Probekörper: PK 21A**Versuchsdaten**

Material: ABI 0/16 S - ATS 0/22 CS
 Haftvermittlerart: ohne
 Haftvermittlermenge: 0 g/m²
 PK-Durchmesser: 152,41 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 20,93 kN
 korr. Scherkraft: 20,27 kN
 Korrekturfaktor: 0,969
 Scherweg (Kolbenweg): 2,349 mm
 Scherweg (IWA A): 1,923 mm
 Scherweg (IWA B): 1,904 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 1,913 mm
 V-Faktor (Kolbenweg) 32,76 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 26,82 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 26,55 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B) 26,69 mm³/N

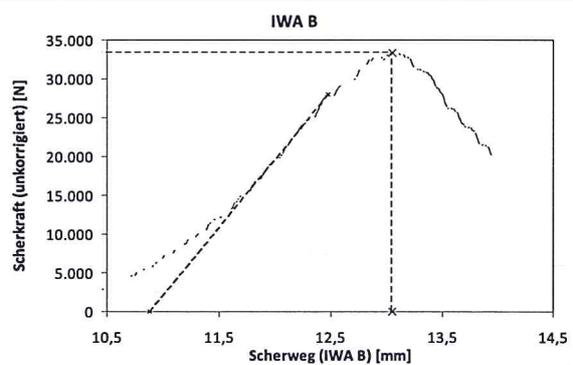
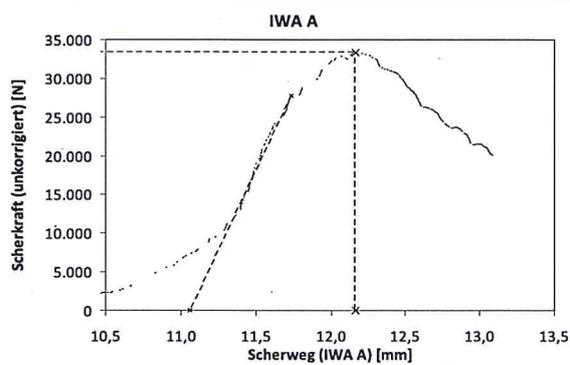
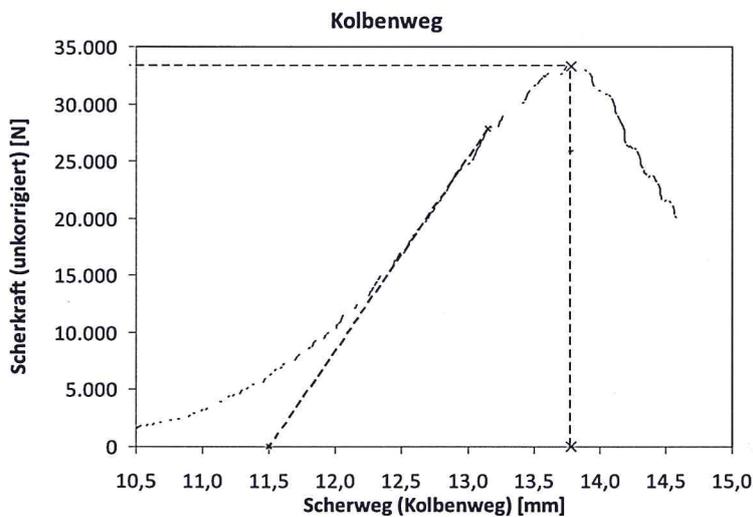
**Tabelle 31: Prüfergebnisse PK 21A**

Probekörper: PK 22A**Versuchsdaten**

Material: ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS
 Haftvermittlerart: U 60 K
 Haftvermittlermenge: 150 g/m²
 PK-Durchmesser: 152,41 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 33,30 kN
 korr. Scherkraft: 89,59 kN
 Korrekturfaktor: 0,969
 Scherweg (Kolbenweg): 2,279 mm
 Scherweg (IWA A): 1,106 mm
 Scherweg (IWA B): 2,168 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 1,637 mm
 V-Faktor (Kolbenweg): 19,98 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg): 9,70 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg): 19,01 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B): 14,35 mm³/N

**Tabelle 32: Prüfergebnisse PK 22A**

Probekörper: PK 23A**Versuchsdaten**

Material: ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS
 Haftvermittlerart: U 60 K
 Haftvermittlermenge: 250 g/m²
 PK-Durchmesser: 152,40 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 15,36 kN
 korr. Scherkraft: 41,34 kN
 Korrekturfaktor: 0,969
 Scherweg (Kolbenweg): 1,290 mm
 Scherweg (IWA A): 0,528 mm
 Scherweg (IWA B): 1,106 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 0,817 mm
 V-Faktor (Kolbenweg): 24,51 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg): 10,02 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg): 21,01 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B): 15,52 mm³/N

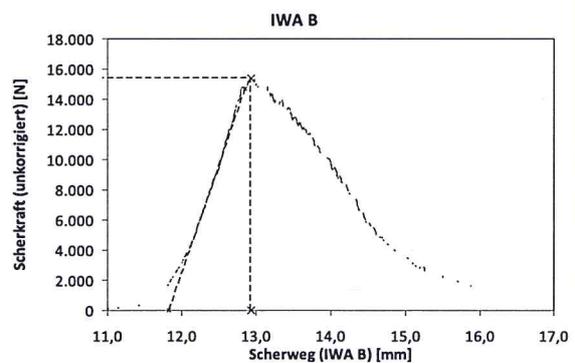
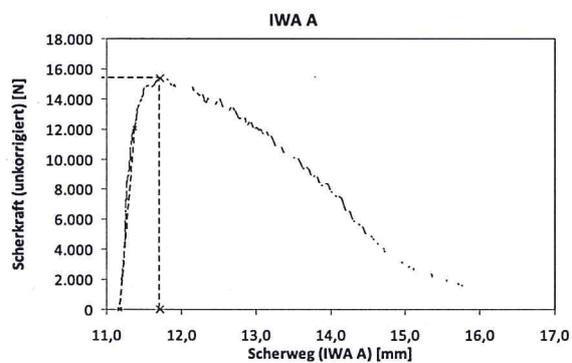
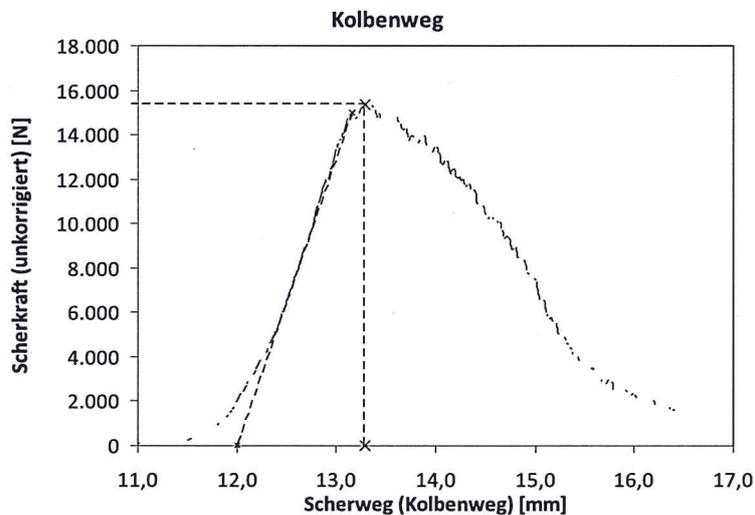


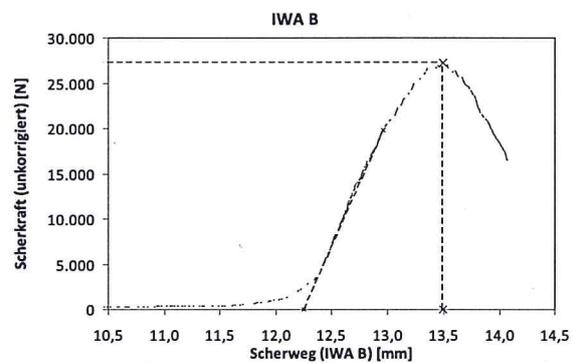
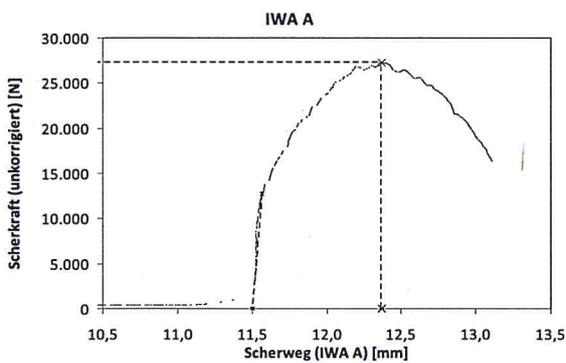
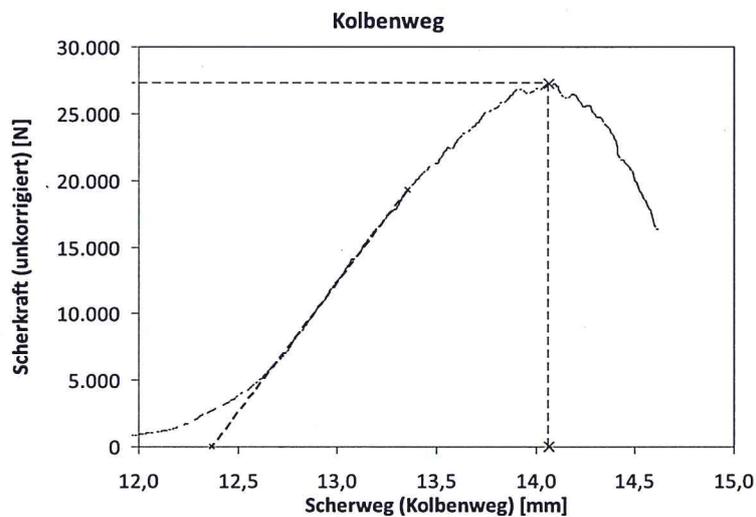
Tabelle 33: Prüfergebnisse PK 23A

Probekörper: PK 24A**Versuchsdaten**

Material: ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS
 Haftvermittlerart: U 60 K
 Haftvermittlermenge: 350 g/m²
 PK-Durchmesser: 152,30 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 27,23 kN
 korr. Scherkraft 73,38 kN
 Korrekturfaktor: 0,970
 Scherweg (Kolbenweg): 1,697 mm
 Scherweg (IWA A): 0,869 mm
 Scherweg (IWA B): 1,242 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 1,055 mm
 V-Faktor (Kolbenweg) 18,16 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 9,30 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 13,30 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B) 11,30 mm³/N

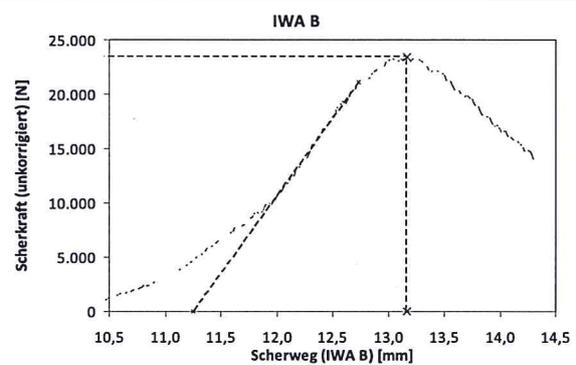
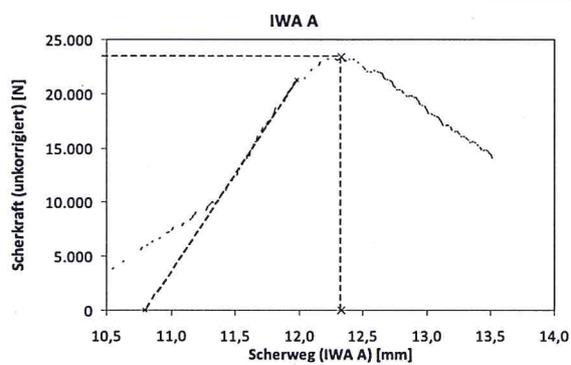
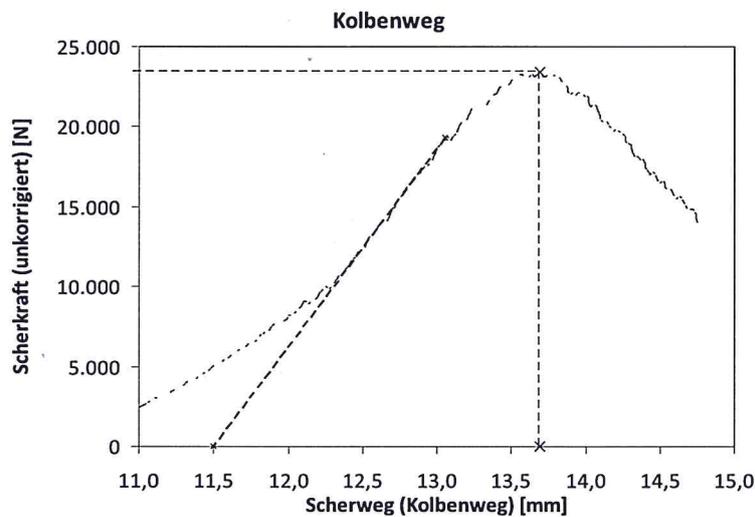
**Tabelle 34: Prüfergebnisse PK 24A**

Probekörper: PK 25A**Versuchsdaten**

Material:	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS
Haftvermittlerart:	PmOB U 60 K Art C2
Haftvermittlermenge:	150 g/m ²
PK-Durchmesser:	152,30 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	23,40 kN
korr. Scherkraft	22,70 kN
Korrekturfaktor:	0,970
Scherweg (Kolbenweg):	2,196 mm
Scherweg (IWA A):	1,528 mm
Scherweg (IWA B):	1,916 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,722 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	27,35 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	19,04 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	23,86 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	21,45 mm ³ /N

**Tabelle 35: Prüfergebnisse PK 25A**

Probekörper: PK 26A

Versuchsdaten

Material: ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS
 Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2
 Haftvermittlermenge: 250 g/m²
 PK-Durchmesser: 152,29 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 42,02 kN
 korr. Scherkraft: 40,76 kN
 Korrekturfaktor: 0,970
 Scherweg (Kolbenweg): 2,214 mm
 Scherweg (IWA A): 1,147 mm
 Scherweg (IWA B): 1,426 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 1,286 mm
 V-Faktor (Kolbenweg): 15,36 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg): 7,95 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg): 9,89 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B): 8,92 mm³/N

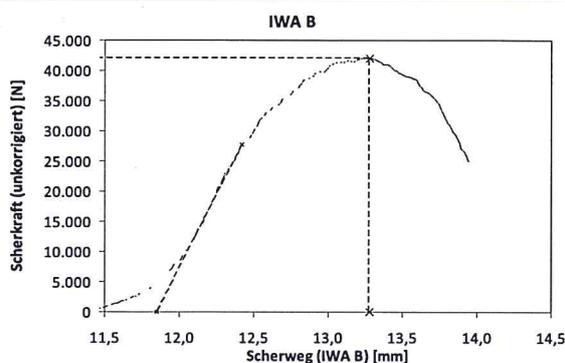
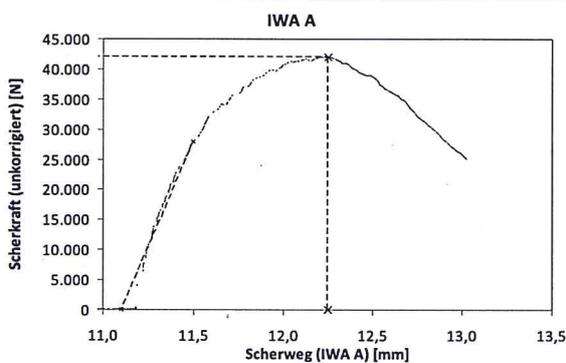
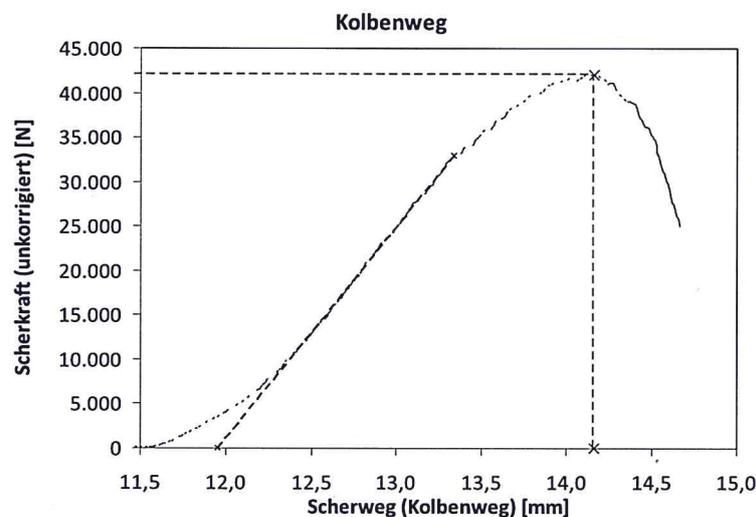


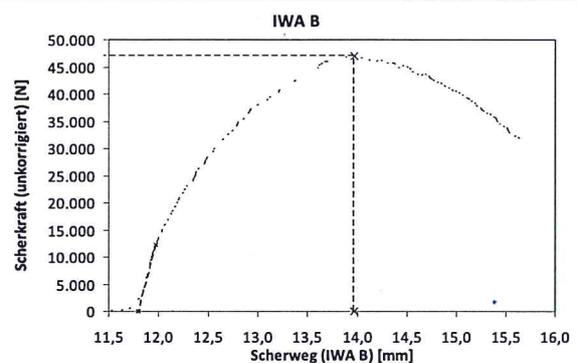
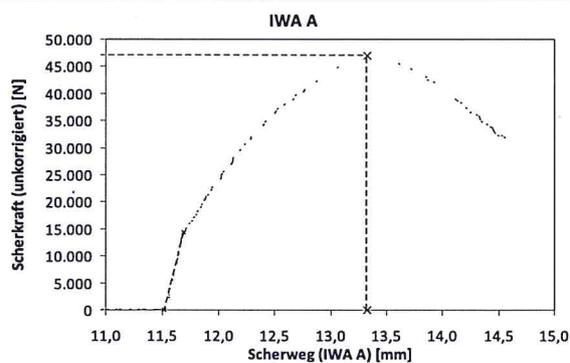
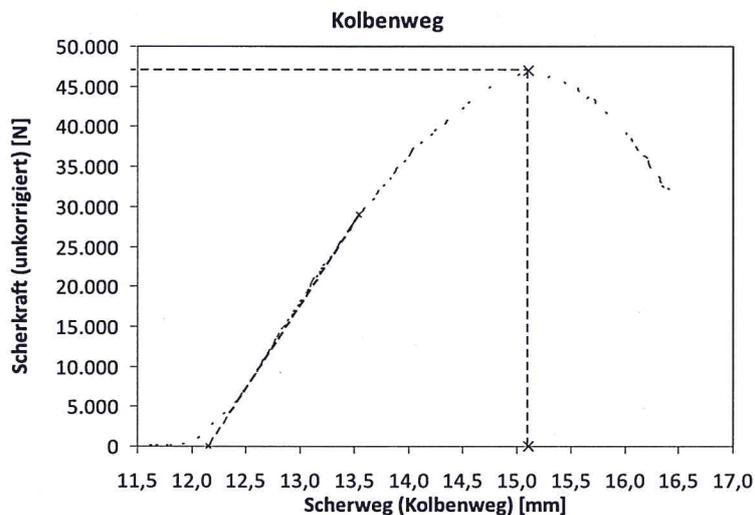
Tabelle 36: Prüfergebnisse PK 26A

Probekörper: PK 27A**Versuchsdaten**

Material:	ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS
Haftvermittlerart:	PmOB U 60 K Art C2
Haftvermittlermenge:	250 g/m ²
PK-Durchmesser:	152,29 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft:	46,99 kN
korr. Scherkraft	45,59 kN
Korrekturfaktor:	0,970
Scherweg (Kolbenweg):	2,957 mm
Scherweg (IWA A):	1,822 mm
Scherweg (IWA B):	2,172 mm
MW Scherweg (IWA A&B):	1,997 mm
V-Faktor (Kolbenweg)	18,34 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	11,30 mm ³ /N
V-Faktor (Kolbenweg)	13,47 mm ³ /N
V-Faktor (MW IWA A&B)	12,39 mm ³ /N

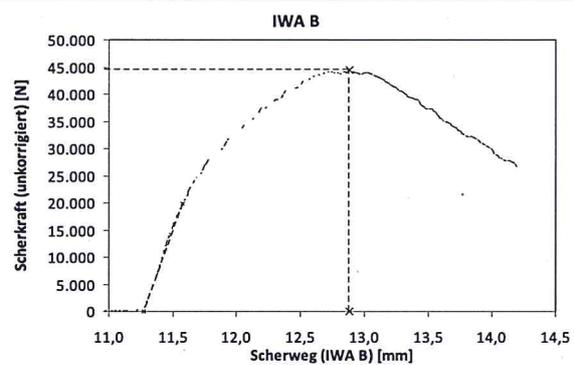
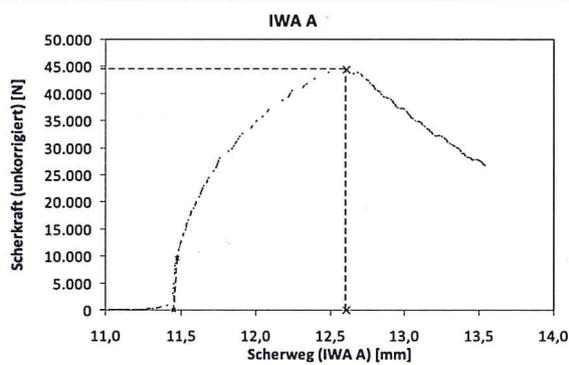
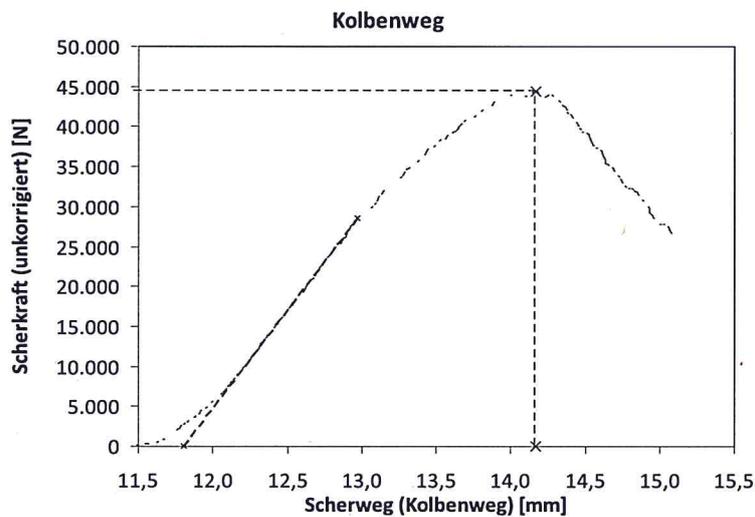
**Tabelle 37: Prüfergebnisse PK 27A**

Probekörper: PK 28A**Versuchsdaten**

Material: ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS
 Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2
 Haftvermittlermenge: 350 g/m²
 PK-Durchmesser: 152,39 mm

Versuchsergebnisse

Scherkraft: 44,43 kN
 korr. Scherkraft: 43,04 kN
 Korrekturfaktor: 0,969
 Scherweg (Kolbenweg): 2,371 mm
 Scherweg (IWA A): 1,159 mm
 Scherweg (IWA B): 1,616 mm
 MW Scherweg (IWA A&B): 1,388 mm
 V-Faktor (Kolbenweg) 15,57 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 7,61 mm³/N
 V-Faktor (Kolbenweg) 10,62 mm³/N
 V-Faktor (MW IWA A&B) 9,11 mm³/N

**Tabelle 38: Prüfergebnisse PK 28A**

Probekörper-Nr.: PK 1B

SMA 0/8 S - ABi 0/16 S

Haftvermittlerart: ohne

Haftvermittlermenge: 0 g/m²

Durchmesser: 99,44 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,415	0,050	0,102	9,770
-10	0,286	0,444	0,048	0,097	10,271
-10	0,572	0,468	0,047	0,094	10,633
-10	0,858	0,502	0,044	0,084	11,951
-10	1,072	0,522	0,042	0,081	12,336
-10	0,000	0,428	0,049	0,104	9,630
10	0,000	0,394	0,053	0,132	7,567
10	0,286	0,421	0,050	0,109	9,201
10	0,572	0,456	0,045	0,098	10,164
10	0,858	0,482	0,044	0,092	10,819
10	1,072	0,496	0,043	0,088	11,395
10	0,000	0,383	0,053	0,123	8,129
30	0,000	0,217	0,073	0,492	2,032
30	0,286	0,313	0,060	0,205	4,869
30	0,572	0,351	0,057	0,148	6,762
30	0,858	0,389	0,054	0,126	7,944
30	1,072	0,413	0,052	0,114	8,808
30	0,000	0,231	0,072	0,402	2,487
50	0,000	0,055	0,093	4,670	0,214
50	0,286	0,231	0,071	0,384	2,601
50	0,572	0,294	0,062	0,178	5,625
50	0,858	0,339	0,056	0,135	7,416
50	1,072	0,367	0,054	0,119	8,408
50	0,000	0,072	0,088	1,799	0,556
-010	0,000	0,469	0,047	0,072	13,981
-010	0,286	0,524	0,045	0,063	15,950
-010	0,572	0,555	0,042	0,058	17,126
-010	0,858	0,591	0,041	0,056	17,965
-010	1,072	0,614	0,041	0,055	18,311
-010	0,000	0,483	0,050	0,070	14,288

Tabelle 39: Prüfergebnisse PK 1B

Probekörper-Nr.: PK 2B**SMA 0/8 S - ABi 0/16 S**

Haftvermittlerart: U 60 K

Haftvermittlermenge: 150 g/m²

Durchmesser: 99,48 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermodul KS
-10	0,000	0,483	0,050	0,104	9,650
-10	0,286	0,485	0,046	0,095	10,540
-10	0,571	0,493	0,046	0,092	10,821
-10	0,857	0,514	0,043	0,083	12,081
-10	1,071	0,525	0,042	0,080	12,440
-10	0,000	0,470	0,050	0,106	9,449
10	0,000	0,425	0,054	0,127	7,896
10	0,286	0,447	0,052	0,117	8,529
10	0,571	0,459	0,050	0,108	9,221
10	0,857	0,461	0,049	0,107	9,348
10	1,071	0,470	0,048	0,103	9,699
10	0,000	0,417	0,054	0,129	7,742
30	0,000	0,185	0,078	0,418	2,390
30	0,286	0,319	0,064	0,201	4,968
30	0,571	0,383	0,061	0,161	6,227
30	0,857	0,422	0,062	0,148	6,756
30	1,071	0,428	0,063	0,148	6,741
30	0,000	0,184	0,076	0,415	2,410
50	0,000	0,035	0,094	2,738	0,365
50	0,286	0,190	0,074	0,388	2,576
50	0,571	0,272	0,070	0,256	3,912
50	0,857	0,295	0,065	0,220	4,552
50	1,071	0,311	0,057	0,185	5,405
50	0,000	0,062	0,090	1,459	0,686
-010	0,000	0,388	0,038	0,099	10,147
-010	0,286	0,400	0,037	0,094	10,684
-010	0,571	0,405	0,037	0,092	10,910
-010	0,857	0,416	0,037	0,088	11,373
-010	1,071	0,429	0,036	0,084	11,850
-010	0,000	0,383	0,038	0,100	9,976

Tabelle 40: Prüfergebnisse PK 2B

Probekörper-Nr.: PK 3B**SMA 0/8 S - ABi 0/16 S**

Haftvermittlerart: U 60 K

Haftvermittlermenge: 250 g/m²

Durchmesser: 99,46 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,190	0,061	0,319	3,135
-10	0,286	0,211	0,061	0,289	3,463
-10	0,572	0,229	0,053	0,231	4,330
-10	0,857	0,241	0,043	0,177	5,649
-10	1,072	0,244	0,037	0,152	6,575
-10	0,000	0,185	0,061	0,329	3,040
10	0,000	0,183	0,081	0,445	2,249
10	0,286	0,266	0,078	0,292	3,429
10	0,572	0,355	0,066	0,186	5,378
10	0,857	0,418	0,057	0,135	7,403
10	1,072	0,452	0,052	0,114	8,740
10	0,000	0,184	0,080	0,437	2,290
30	0,000	0,067	0,095	1,408	0,710
30	0,286	0,233	0,081	0,347	2,881
30	0,572	0,330	0,068	0,206	4,854
30	0,857	0,391	0,061	0,156	6,419
30	1,072	0,422	0,057	0,136	7,356
30	0,000	0,056	0,094	1,693	0,591
50	0,000	0,019	0,098	5,122	0,195
50	0,286	0,194	0,083	0,425	2,355
50	0,572	0,284	0,074	0,262	3,822
50	0,857	0,344	0,068	0,197	5,075
50	1,072	0,377	0,065	0,172	5,816
50	0,000	0,031	0,096	3,116	0,321
-010	0,000	0,604	0,041	0,068	14,795
-010	0,286	0,625	0,040	0,064	15,528
-010	0,572	0,640	0,040	0,062	16,076
-010	0,857	0,662	0,038	0,057	17,448
-010	1,072	0,670	0,037	0,055	18,089
-010	0,000	0,573	0,042	0,073	13,619

Tabelle 41: Prüfergebnisse PK 3B

Probekörper-Nr.: PK 4B**SMA 0/8 S - ABi 0/16 S**

Haftvermittlerart: U 60 K

Haftvermittlermenge: 350 g/m²

Durchmesser: 99,49 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,521	0,053	0,102	9,770
-10	0,286	0,537	0,052	0,097	10,271
-10	0,571	0,549	0,052	0,094	10,633
-10	0,857	0,573	0,048	0,084	11,951
-10	1,071	0,583	0,047	0,081	12,336
-10	0,000	0,503	0,052	0,104	9,630
10	0,000	0,433	0,057	0,132	7,567
10	0,286	0,466	0,051	0,109	9,201
10	0,571	0,479	0,047	0,098	10,164
10	0,857	0,494	0,046	0,092	10,819
10	1,071	0,508	0,045	0,088	11,395
10	0,000	0,433	0,053	0,123	8,129
30	0,000	0,170	0,084	0,492	2,032
30	0,286	0,303	0,062	0,205	4,869
30	0,286	0,372	0,055	0,148	6,762
30	0,857	0,409	0,051	0,126	7,944
30	1,071	0,438	0,050	0,114	8,808
30	0,000	0,195	0,079	0,402	2,487
50	0,000	0,021	0,098	4,670	0,214
50	0,286	0,216	0,083	0,384	2,601
50	0,571	0,330	0,059	0,178	5,625
50	0,857	0,383	0,052	0,135	7,416
50	1,071	0,411	0,049	0,119	8,408
50	0,000	0,052	0,093	1,799	0,556
-010	0,000	0,545	0,039	0,072	13,981
-010	0,286	0,588	0,037	0,063	15,950
-010	0,571	0,615	0,036	0,058	17,126
-010	0,857	0,632	0,035	0,056	17,965
-010	1,071	0,639	0,035	0,055	18,311
-010	0,000	0,555	0,039	0,070	14,288

Tabelle 42: Prüfergebnisse PK 4B

Probekörper-Nr.: PK 5C**SMA 0/8 S - ABi 0/16 S**

Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2

Haftvermittlermenge: 150 g/m²

Durchmesser: 99,52 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,618	0,036	0,059	16,965
-10	0,285	0,620	0,036	0,058	17,237
-10	0,571	0,626	0,035	0,057	17,663
-10	0,856	0,633	0,035	0,055	18,117
-10	1,070	0,636	0,034	0,053	18,844
-10	0,000	0,590	0,037	0,062	16,160
10	0,000	0,371	0,066	0,177	5,657
10	0,285	0,432	0,054	0,177	5,657
10	0,571	0,468	0,047	0,125	7,995
10	0,856	0,506	0,044	0,100	9,968
10	1,070	0,531	0,042	0,087	11,445
10	0,000	0,385	0,056	0,079	12,579
30	0,000	0,140	0,078	0,146	6,865
30	0,285	0,344	0,056	0,555	1,803
30	0,571	0,402	0,050	0,162	6,157
30	0,856	0,432	0,047	0,124	8,068
30	1,070	0,446	0,046	0,108	9,293
30	0,000	0,227	0,066	0,102	9,764
50	0,000	0,054	0,092	0,290	3,449
50	0,285	0,228	0,069	1,696	0,590
50	0,571	0,306	0,058	0,302	3,307
50	0,856	0,347	0,056	0,189	5,291
50	1,070	0,366	0,057	0,161	6,213
50	0,000	0,066	0,089	0,155	6,445
-010	0,000	0,651	0,038	1,341	0,746
-010	0,285	0,677	0,038	0,059	16,969
-010	0,571	0,692	0,037	0,056	17,967
-010	0,856	0,700	0,037	0,054	18,665
-010	1,070	0,698	0,037	0,053	18,895
-010	0,000	0,631	0,039	0,053	18,980

Tabelle 43: Prüfergebnisse PK 5C

Probekörper-Nr.: PK 6B**SMA 0/8 S - ABi 0/16 S**

Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2

Haftvermittlermenge: 250 g/m²

Durchmesser: 99,49 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,461	0,053	0,114	8,764
-10	0,286	0,455	0,055	0,120	8,330
-10	0,571	0,458	0,056	0,122	8,175
-10	0,857	0,431	0,062	0,145	6,919
-10	1,071	0,440	0,060	0,135	7,396
-10	0,000	0,432	0,058	0,134	7,448
10	0,000	0,227	0,071	0,311	3,212
10	0,286	0,319	0,061	0,191	5,243
10	0,571	0,425	0,056	0,133	7,527
10	0,857	0,486	0,049	0,101	9,872
10	1,071	0,507	0,046	0,091	11,014
10	0,000	0,283	0,062	0,220	4,543
30	0,000	0,242	0,074	0,305	3,275
30	0,286	0,349	0,064	0,183	5,460
30	0,571	0,418	0,060	0,143	6,985
30	0,857	0,483	0,057	0,117	8,554
30	1,071	0,501	0,056	0,112	8,908
30	0,000	0,250	0,072	0,289	3,461
50	0,000	0,060	0,092	1,522	0,657
50	0,286	0,218	0,079	0,363	2,753
50	0,571	0,294	0,074	0,253	3,953
50	0,857	0,331	0,070	0,211	4,737
50	1,071	0,348	0,064	0,185	5,405
50	0,000	0,070	0,090	1,284	0,779
-010	0,000	0,560	0,036	0,065	15,426
-010	0,286	0,573	0,035	0,062	16,241
-010	0,571	0,580	0,035	0,060	16,680
-010	0,857	0,585	0,035	0,059	16,887
-010	1,071				
-010	0,000	0,557	0,037	0,066	15,170

Tabelle 44: Prüfergebnisse PK 6B

Probekörper-Nr.: PK 8B**SMA 0/8 S - ABi 0/16 S**

Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2

Haftvermittlermenge: 350 g/m²

Durchmesser: 99,50 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,554	0,047	0,085	11,781
-10	0,286	0,589	0,043	0,073	13,686
-10	0,571	0,612	0,040	0,065	15,430
-10	0,857	0,620	0,039	0,062	16,067
-10	1,071	0,623	0,038	0,061	16,515
-10	0,000	0,540	0,043	0,079	12,579
10	0,000	0,310	0,066	0,214	4,677
10	0,286	0,318	0,067	0,212	4,722
10	0,571	0,369	0,058	0,157	6,367
10	0,857	0,404	0,053	0,132	7,587
10	1,071	0,433	0,050	0,115	8,734
10	0,000	0,303	0,065	0,213	4,689
30	0,000	0,229	0,071	0,308	3,243
30	0,286	0,326	0,055	0,168	5,956
30	0,571	0,373	0,052	0,139	7,203
30	0,857	0,418	0,048	0,114	8,737
30	1,071	0,443	0,046	0,104	9,654
30	0,000	0,236	0,069	0,290	3,446
50	0,000	0,050	0,094	1,860	0,537
50	0,286	0,229	0,062	0,270	3,703
50	0,571	0,314	0,055	0,174	5,731
50	0,857	0,345	0,056	0,162	6,166
50	1,071	0,361	0,055	0,151	6,624
50	0,000	0,062	0,090	1,461	0,685
-010	0,000	0,543	0,041	0,075	13,355
-010	0,286	0,571	0,039	0,068	14,634
-010	0,571	0,576	0,038	0,067	14,989
-010	0,857	0,587	0,038	0,064	15,573
-010	1,071	0,598	0,037	0,062	16,205
-010	0,000	0,518	0,042	0,080	12,480

Tabelle 45: Prüfergebnisse PK 8B

Probekörper-Nr.: PK 11B**SMA 0/8 S, monolithisch**

Haftvermittlerart: ohne

Haftvermittlermenge: ---

Durchmesser: 99,52 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,536	0,035	0,064	15,507
-10	0,285	0,554	0,037	0,067	14,887
-10	0,571	0,564	0,037	0,065	15,332
-10	0,856	0,573	0,035	0,062	16,182
-10	1,070	0,576	0,035	0,061	16,447
-10	0,000	0,533	0,038	0,072	13,924
10	0,000	0,394	0,042	0,105	9,483
10	0,285	0,413	0,040	0,096	10,425
10	0,571	0,428	0,039	0,092	10,897
10	0,856	0,442	0,039	0,088	11,373
10	1,070	0,455	0,039	0,085	11,776
10	0,000	0,458	0,038	0,084	11,918
30	0,000	0,201	0,073	0,366	2,734
30	0,285	0,302	0,065	0,217	4,611
30	0,571	0,352	0,060	0,171	5,857
30	0,856	0,353	0,058	0,165	6,051
30	1,070	0,356	0,058	0,163	6,139
30	0,000	0,169	0,074	0,437	2,291
50	0,000	0,036	0,095	2,632	0,380
50	0,285	0,169	0,082	0,484	2,067
50	0,571	0,212	0,071	0,333	2,999
50	0,856	0,240	0,067	0,279	3,581
50	1,070	0,259	0,064	0,248	4,026
50	0,000	0,038	0,094	2,471	0,405
-010	0,000	0,603	0,037	0,062	16,103
-010	0,285	0,608	0,037	0,061	16,294
-010	0,571	0,622	0,036	0,059	17,048
-010	0,856	0,634	0,036	0,057	17,555
-010	1,070	0,638	0,036	0,056	17,886
-010	0,000	0,560	0,038	0,069	14,590

Tabelle 46: Prüfergebnisse PK 11B

Probekörper-Nr.: PK 12B**ABi 0/16 S, monolithisch**

Haftvermittlerart: ohne

Haftvermittlermenge: ---

Durchmesser: 99,54 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,496	0,035	0,071	14,099
-10	0,285	0,524	0,034	0,064	15,559
-10	0,571	0,532	0,034	0,064	15,579
-10	0,856	0,548	0,033	0,061	16,418
-10	1,070	0,555	0,033	0,060	16,600
-10	0,000	0,466	0,036	0,078	12,831
10	0,000	0,415	0,043	0,103	9,746
10	0,285	0,454	0,041	0,090	11,129
10	0,571	0,491	0,040	0,081	12,286
10	0,856	0,524	0,038	0,073	13,627
10	1,070	0,542	0,037	0,069	14,595
10	0,000	0,413	0,044	0,106	9,465
30	0,000	0,255	0,066	0,256	3,899
30	0,285	0,326	0,055	0,168	5,968
30	0,571	0,381	0,049	0,130	7,715
30	0,856	0,420	0,045	0,107	9,357
30	1,070	0,438	0,043	0,097	10,260
30	0,000	0,224	0,065	0,293	3,418
50	0,000	0,069	0,091	1,307	0,765
50	0,285	0,226	0,066	0,293	3,416
50	0,571	0,318	0,050	0,158	6,346
50	0,856	0,344	0,052	0,152	6,592
50	1,070	0,347	0,052	0,150	6,648
50	0,000	0,068	0,089	1,306	0,766
-010	0,000	0,614	0,040	0,065	15,336
-010	0,285	0,664	0,039	0,059	17,090
-010	0,571	0,675	0,039	0,058	17,150
-010	0,856	0,676	0,039	0,058	17,142
-010	1,070	0,681	0,039	0,057	17,486
-010	0,000	0,618	0,038	0,062	16,106

Tabelle 47: Prüfergebnisse PK 12B

Probekörper-Nr.: PK 13B**ATS 0/22 CS, monolithisch**

Haftvermittlerart: ohne

Haftvermittlermenge: ---

Durchmesser: 99,54 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,585	0,043	0,073	13,696
-10	0,285	0,590	0,048	0,081	12,381
-10	0,571	0,596	0,047	0,078	12,805
-10	0,856	0,598	0,036	0,061	16,496
-10	1,070	0,596	0,036	0,061	16,479
-10	0,000	0,564	0,040	0,071	14,183
10	0,000	0,414	0,049	0,117	8,531
10	0,285	0,445	0,046	0,104	9,648
10	0,571	0,469	0,045	0,097	10,306
10	0,856	0,482	0,045	0,092	10,816
10	1,070	0,497	0,044	0,089	11,276
10	0,000	0,397	0,050	0,127	7,878
30	0,000	0,197	0,072	0,366	2,733
30	0,285	0,000	0,000	Fehler	Fehler
30	0,571	0,318	0,062	0,195	5,126
30	0,856	0,415	0,056	0,136	7,363
30	1,070	0,438	0,053	0,122	8,199
30	0,000	0,186	0,073	0,391	2,556
50	0,000	0,000	0,000	0,106	9,444
50	0,285	0,238	0,069	0,289	3,458
50	0,571	0,325	0,053	0,162	6,187
50	0,856	0,363	0,047	0,130	7,717
50	1,070	0,376	0,049	0,130	7,671
50	0,000	0,072	0,087	1,206	0,830
-010	0,000	0,409	0,038	0,092	10,811
-010	0,285	0,462	0,037	0,080	12,553
-010	0,571	0,503	0,036	0,072	13,984
-010	0,856	0,528	0,035	0,067	14,872
-010	1,070	0,529	0,036	0,067	14,837
-010	0,000	0,454	0,036	0,080	12,512

Tabelle 48: Prüfergebnisse PK 13B

Probekörper-Nr.: PK 21B-V2**ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS**

Haftvermittlerart: ohne

Haftvermittlermenge: 0 g/m²

Durchmesser: 99,68 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,017	0,099	5,885	0,170
-10	0,285	0,329	0,056	0,170	5,892
-10	0,569	0,428	0,043	0,101	9,912
-10	0,853	0,457	0,042	0,091	11,019
-10	1,067	0,464	0,040	0,087	11,490
-10	0,000	0,028	0,048	1,744	0,573
10	0,000	0,014	0,099	7,180	0,139
10	0,285	0,291	0,060	0,206	4,851
10	0,569	0,371	0,052	0,139	7,204
10	0,853	0,430	0,048	0,112	8,952
10	1,067	0,474	0,046	0,097	10,323
10	0,000	0,022	0,097	4,351	0,230
30	0,000	0,013	0,098	7,747	0,129
30	0,285	0,273	0,064	0,236	4,229
30	0,569	0,328	0,060	0,184	5,424
30	0,853	0,361	0,057	0,157	6,371
30	1,067	0,376	0,054	0,144	6,940
30	0,000	0,020	0,096	4,883	0,205
50	0,000	0,010	0,099	10,168	0,098
50	0,285	0,143	0,086	0,601	1,663
50	0,569	0,197	0,078	0,399	2,509
50	0,853	0,241	0,067	0,277	3,617
50	1,067	0,255	0,063	0,246	4,068
50	0,000	0,023	0,097	4,172	0,240
-010	0,000	0,023	0,097	4,304	0,232
-010	0,285	0,368	0,057	0,156	6,400
-010	0,569	0,517	0,042	0,081	12,330
-010	0,853	0,572	0,037	0,065	15,299
-010	1,067	0,591	0,037	0,062	16,094
-010	0,000	0,024	0,096	3,990	0,251

Tabelle 49: Prüfergebnisse PK 21B-V2

Probekörper-Nr.: PK 22B**ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS**

Haftvermittlerart: U 60 K

Haftvermittlermenge: 150 g/m²

Durchmesser: 99,65 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,616	0,044	0,071	14,005
-10	0,285	0,612	0,045	0,073	13,647
-10	0,569	0,621	0,045	0,073	13,750
-10	0,854	0,643	0,045	0,070	14,340
-10	1,067	0,669	0,046	0,069	14,468
-10	0,000	0,591	0,048	0,081	12,325
10	0,000	0,348	0,057	0,165	6,076
10	0,285	0,357	0,057	0,158	6,323
10	0,569	0,380	0,054	0,143	7,005
10	0,854	0,416	0,051	0,122	8,167
10	1,067	0,431	0,049	0,113	8,865
10	0,000	0,342	0,057	0,168	5,962
30	0,000	0,271	0,063	0,234	4,277
30	0,285	0,290	0,063	0,219	4,573
30	0,569	0,331	0,059	0,178	5,624
30	0,854	0,370	0,054	0,145	6,873
30	1,067	0,386	0,052	0,135	7,385
30	0,000	0,256	0,064	0,248	4,024
50	0,000	0,189	0,069	0,363	2,756
50	0,285	0,236	0,066	0,280	3,566
50	0,569	0,306	0,059	0,193	5,175
50	0,854	0,361	0,054	0,151	6,636
50	1,067	0,374	0,055	0,146	6,835
50	0,000	0,137	0,080	0,581	1,721
-010	0,000	0,358	0,045	0,126	7,931
-010	0,285	0,363	0,046	0,127	7,897
-010	0,569	0,377	0,047	0,124	8,043
-010	0,854	0,393	0,047	0,119	8,416
-010	1,067	0,403	0,046	0,115	8,723
-010	0,000	0,360	0,047	0,130	7,669

Tabelle 50: Prüfergebnisse PK 22B

Probekörper-Nr.: PK 23B**ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS**

Haftvermittlerart: U 60 K

Haftvermittlermenge: 250 g/m²

Durchmesser: 99,70 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,397	0,046	0,116	8,607
-10	0,285	0,433	0,045	0,104	9,628
-10	0,570	0,447	0,045	0,101	9,879
-10	0,854	0,466	0,045	0,096	10,465
-10	1,068	0,483	0,044	0,092	10,848
-10	0,000	0,395	0,049	0,124	8,050
10	0,000	0,369	0,056	0,151	6,613
10	0,285	0,438	0,050	0,113	8,841
10	0,570	0,480	0,046	0,095	10,494
10	0,854	0,509	0,043	0,085	11,828
10	1,068	0,523	0,042	0,080	12,514
10	0,000	0,331	0,060	0,181	5,536
30	0,000	0,096	0,086	0,897	1,114
30	0,285	0,312	0,061	0,196	5,091
30	0,570	0,387	0,055	0,142	7,048
30	0,854	0,406	0,051	0,126	7,958
30	1,068	0,416	0,049	0,118	8,443
30	0,000	0,108	0,083	0,767	1,304
50	0,000	0,022	0,098	4,464	0,224
50	0,285	0,216	0,074	0,343	2,918
50	0,570	0,323	0,060	0,184	5,433
50	0,854	0,369	0,053	0,144	6,948
50	1,068	0,391	0,049	0,126	7,906
50	0,000	0,033	0,096	2,878	0,348
-010	0,000	0,616	0,036	0,059	16,914
-010	0,285	0,647	0,035	0,054	18,568
-010	0,570	0,660	0,034	0,052	19,155
-010	0,854	0,665	0,034	0,052	19,306
-010	1,068	0,662	0,034	0,052	19,263
-010	0,000	0,600	0,037	0,061	16,326

Tabelle 51: Prüfergebnisse PK 23B

Probekörper-Nr.: PK 24B**ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS**

Haftvermittlerart: U 60 K

Haftvermittlermenge: 350 g/m²

Durchmesser: 99,70 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,434	0,053	0,123	8,158
-10	0,284	0,433	0,052	0,121	8,286
-10	0,569	0,438	0,048	0,109	9,147
-10	0,853	0,433	0,047	0,109	9,133
-10	1,066	0,434	0,049	0,112	8,891
-10	0,000	0,421	0,052	0,124	8,066
10	0,000	0,283	0,062	0,218	4,580
10	0,284				
10	0,569	0,349	0,053	0,152	6,594
10	0,853	0,384	0,051	0,134	7,461
10	1,066	0,405	0,049	0,120	8,330
10	0,000	0,294	0,060	0,205	4,889
30	0,000	0,122	0,083	0,681	1,469
30	0,284	0,247	0,072	0,291	3,437
30	0,569	0,299	0,066	0,221	4,530
30	0,853	0,343	0,059	0,172	5,812
30	1,066	0,373	0,057	0,152	6,566
30	0,000	0,125	0,082	0,656	1,525
50	0,000	0,023	0,097	4,224	0,237
50	0,284	0,178	0,082	0,460	2,174
50	0,569	0,254	0,074	0,290	3,448
50	0,853	0,309	0,065	0,212	4,724
50	1,066	0,340	0,061	0,180	5,548
50	0,000	0,030	0,096	3,161	0,316
-010	0,000	0,475	0,047	0,098	10,208
-010	0,284	0,452	0,048	0,107	9,326
-010	0,569	0,458	0,047	0,102	9,850
-010	0,853	0,469	0,046	0,097	10,279
-010	1,066	0,476	0,045	0,096	10,463
-010	0,000	0,418	0,049	0,117	8,534

Tabelle 52: : Prüfergebnisse PK 24B

Probekörper-Nr.: PK 25B**ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS**

Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2

Haftvermittlermenge: 150 g/m²

Durchmesser: 99,70 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,401	0,042	0,105	9,501
-10	0,284	0,377	0,043	0,114	8,799
-10	0,569	0,371	0,044	0,120	8,349
-10	0,853	0,399	0,043	0,108	9,293
-10	1,067	0,410	0,044	0,108	9,273
-10	0,000	0,333	0,050	0,150	6,677
10	0,000	0,053	0,089	1,681	0,595
10	0,284	0,271	0,062	0,229	4,361
10	0,569	0,325	0,055	0,169	5,900
10	0,853	0,389	0,049	0,127	7,903
10	1,067	0,422	0,047	0,112	8,895
10	0,000	0,072	0,087	1,216	0,822
30	0,000	0,022	0,096	4,275	0,234
30	0,284	0,184	0,083	0,451	2,218
30	0,569	0,276	0,069	0,251	3,986
30	0,853	0,333	0,062	0,188	5,328
30	1,067	0,359	0,059	0,165	6,053
30	0,000	0,033	0,095	2,835	0,353
50	0,000	0,012	0,099	8,160	0,123
50	0,284	0,206	0,069	0,334	2,990
50	0,569	0,291	0,060	0,207	4,824
50	0,853	0,336	0,055	0,165	6,075
50	1,067	0,363	0,053	0,146	6,871
50	0,000	0,500	0,040	0,080	12,424
-010	0,000	0,500	0,040	0,080	12,424
-010	0,284	0,498	0,041	0,082	12,184
-010	0,569	0,517	0,039	0,076	13,126
-010	0,853	0,512	0,042	0,082	12,239
-010	1,067	0,510	0,041	0,081	12,301
-010	0,000	0,468	0,045	0,095	10,487

Tabelle 53: Prüfergebnisse PK 25B

Probekörper-Nr.: PK 26B

ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS

Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2

Haftvermittlermenge: 250 g/m²

Durchmesser: 99,71 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,526	0,041	2,565	0,390
-10	0,284	0,530	0,042	0,322	3,110
-10	0,569	0,522	0,044	0,200	5,009
-10	0,853	0,533	0,043	0,152	6,569
-10	1,066	0,534	0,042	0,125	8,005
-10	0,000	0,494	0,044	1,983	0,504
10	0,000	0,462	0,048	0,104	9,654
10	0,284	0,456	0,047	0,104	9,652
10	0,569	0,458	0,046	0,101	9,938
10	0,853	0,475	0,044	0,093	10,743
10	1,066	0,488	0,045	0,091	10,950
10	0,000	0,390	0,050	0,128	7,788
30	0,000	0,192	0,079	0,410	2,439
30	0,284	0,267	0,072	0,271	3,688
30	0,569	0,340	0,065	0,191	5,242
30	0,853	0,429	0,056	0,131	7,644
30	1,066	0,470	0,052	0,112	8,952
30	0,000	0,156	0,082	0,528	1,895
50	0,000	0,036	0,093	2,565	0,390
50	0,284	0,226	0,073	0,322	3,110
50	0,569	0,315	0,063	0,200	5,009
50	0,853	0,362	0,055	0,152	6,569
50	1,066	0,390	0,049	0,125	8,005
50	0,000	0,045	0,090	1,983	0,504
-010	0,000	0,036	0,093	2,565	0,390
-010	0,284	0,226	0,073	0,322	3,110
-010	0,569	0,315	0,063	0,200	5,009
-010	0,853	0,362	0,055	0,152	6,569
-010	1,066	0,390	0,049	0,125	8,005
-010	0,000	0,045	0,090	1,983	0,504

Tabelle 54: Prüfergebnisse PK 26B

Probekörper-Nr.: PK 28B**ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS**

Haftvermittlerart: PmOB U 60 K Art C2

Haftvermittlermenge: 350 g/m²

Durchmesser: 99,71 mm

Frequenz: 1 Hz

Soll-Scherweg: 0,10 mm

Temperatur	Normalspannung	Scherspannung	Scherweg	Verbundfaktor VF	Schermoul KS
-10	0,000	0,570	0,041	0,081	12,284
-10	0,284	0,551	0,040	0,076	13,121
-10	0,569	0,545	0,036	0,072	13,954
-10	0,853	0,569	0,033	0,066	15,136
-10	1,067	0,577	0,033	0,065	15,496
-10	0,000	0,513	0,038	0,086	11,562
10	0,000	0,429	0,046	0,107	9,356
10	0,284	0,466	0,042	0,090	11,140
10	0,569	0,518	0,040	0,077	13,046
10	0,853	0,539	0,040	0,074	13,482
10	1,067	0,555	0,040	0,072	13,839
10	0,000	0,335	0,047	0,139	7,187
30	0,000	0,184	0,074	0,402	2,487
30	0,284	0,272	0,065	0,240	4,171
30	0,569	0,339	0,059	0,173	5,765
30	0,853	0,385	0,054	0,140	7,161
30	1,067	0,407	0,053	0,129	7,730
30	0,000	0,178	0,072	0,407	2,457
50	0,000	0,037	0,094	2,554	0,392
50	0,284	0,187	0,078	0,416	2,405
50	0,569	0,272	0,071	0,260	3,853
50	0,853	0,330	0,065	0,197	5,072
50	1,067	0,365	0,061	0,166	6,012
50	0,000	0,043	0,093	2,161	0,463
-010	0,000	0,530	0,043	0,081	12,284
-010	0,284	0,552	0,042	0,076	13,121
-010	0,569	0,567	0,041	0,072	13,954
-010	0,853	0,583	0,039	0,066	15,136
-010	1,067	0,588	0,038	0,065	15,496
-010	0,000	0,489	0,042	0,086	11,562

Tabelle 55: Prüfergebnisse PK 28B

		Verbundfaktoren V_f für:	
		schlechtesten Verbund	besten Verbund
Probekörper:		PK 3B	PK 8B
Material:		SMA 0/8 S - ABi 0/16 S	
Haftvermittler:		U 60 K; 250 g/m ²	PmOB U 60 K Art C2
Normalspannung:		0,85 N/mm ²	0,85 N/mm ²
Oberflächen- temperatur:	Temperatur in Schichttiefe 40 mm:	Verbundfaktor V_f in Schichttiefe 40 mm	
	[°C]	[mm ³ /N]	[mm ³ /N]
-12,5	-10,3	0,154	0,073
MW	-10	0,177	0,062
-7,5	-6,0	0,155	0,078
-2,5	-1,7	0,156	0,082
2,5	2,7	0,158	0,087
7,5	7,5	0,159	0,093
MW	10	0,135	0,132
12,5	12,6	0,161	0,099
17,5	17,6	0,163	0,106
22,5	22,0	0,164	0,112
27,5	26,2	0,165	0,118
MW	30	0,156	0,114
32,5	30,4	0,167	0,125
37,5	34,6	0,168	0,132
42,5	39,0	0,170	0,139
47,5	43,5	0,171	0,148
MW	50	0,197	0,162

Tabelle 56: Verbundfaktoren in Abhängigkeit von der Temperatur SMA 0/8 S - ABi 0/16 S

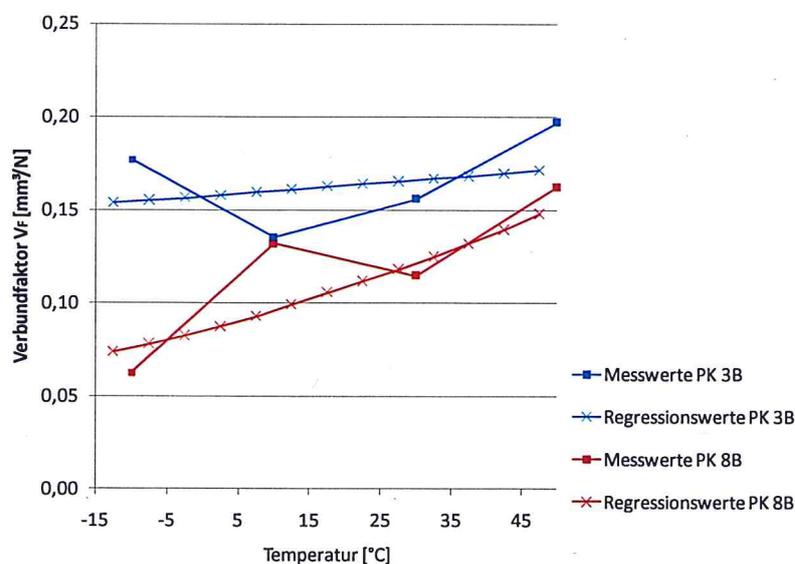


Abbildung 99: Diagramm zur Tabelle Verbundfaktoren SMA 0/8 S - ABi 0/16 S

		Verbundfaktoren V_f für:	
		schlechtesten Verbund	besten Verbund
Probekörper:		PK 21B-V2	PK 28B
Material:		ABi 0/16 S - ATS 0/22 CS	
Haftvermittler:		ohne	PmOB U 60 K Art C2
Normalspannung:		0,57 N/mm ²	0,57 N/mm ²

Oberflächen- temperatur:	Temperatur in Schichttiefe 80 mm	Verbundfaktor in Schichttiefe 80/120 mm	
		[mm ³ /N]	[mm ³ /N]
[-12,5	-8,7	0,092	0,064
MW	-10	0,101	0,072
-7,5	-4,9	0,101	0,070
-2,5	-1,0	0,112	0,076
2,5	2,9	0,124	0,083
7,5	7,6	0,140	0,093
MW	10	0,139	0,077
12,5	12,7	0,160	0,104
17,5	17,7	0,182	0,117
22,5	21,6	0,201	0,128
27,5	25,1	0,221	0,139
MW	30	0,184	0,173
32,5	28,9	0,244	0,151
37,5	32,5	0,268	0,165
42,5	36,3	0,296	0,180
47,5	40,4	0,329	0,198
MW	50	0,399	0,260

Tabelle 57: Verbundfaktoren in Abhängigkeit von der Temperatur ABi 0/16 S – ATS 0/22CS

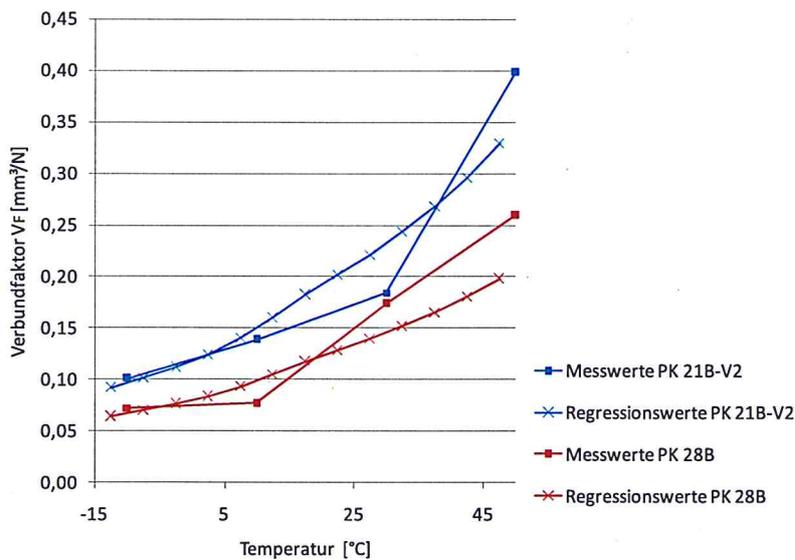


Abbildung 100: Diagramm zur Tabelle Verbundfaktoren ABi 0/16 S – ATS 0/22 CS

Variante 1

Tiefe	E-Moduli [N/mm ²] für 13 Oberflächentemperaturen													
	von	bis	-12,5°C	-7,5°C	-2,5°C	2,5°C	7,5°C	12,5°C	17,5°C	22,5°C	27,5°C	32,5°C	37,5°C	42,5°C
0	- 10	23516	21007	18228	15316	12388	9611	7162	4800	2943	1802	1105	676	413
10	- 20	23233	20784	18095	15278	12383	9596	7146	4871	3052	1907	1193	744	460
20	- 30	22968	20577	17972	15243	12378	9583	7131	4936	3156	2009	1281	812	509
30	- 40	22719	20385	17859	15211	12374	9571	7117	4998	3255	2107	1368	880	558
40	- 50	25531	22942	20159	17237	14045	10855	8067	5740	3803	2501	1651	1078	690
50	- 60	25279	22751	20047	17206	14041	10843	8054	5802	3906	2607	1747	1156	748
60	- 70	25040	22571	19943	17176	14037	10831	8041	5860	4005	2710	1843	1235	807
70	- 80	24814	22401	19844	17148	14033	10821	8029	5916	4101	2811	1938	1313	866
80	- 90	24597	22240	19751	17122	14029	10811	8018	5969	4193	2910	2032	1393	925
90	- 100	24391	22087	19663	17097	14026	10802	8008	6019	4283	3006	2125	1472	986
100	- 110	24193	21941	19579	17073	14023	10793	7998	6068	4369	3101	2217	1551	1047
110	- 120	24003	21801	19499	17051	14019	10784	7988	6114	4453	3194	2309	1631	1109
120	- 130	22644	20612	18496	16239	13372	10278	7609	5897	4366	3178	2333	1671	1147
140	- 160	22322	20377	18362	16201	13367	10264	7593	5977	4514	3347	2505	1824	1268
160	- 180	22021	20160	18239	16166	13362	10251	7578	6051	4655	3511	2675	1978	1391
180	- 200	21740	19957	18124	16134	13358	10239	7565	6120	4791	3671	2843	2132	1516
200	- 220	21475	19767	18016	16104	13354	10227	7552	6186	4920	3826	3009	2287	1643
220	- 240	21225	19589	17916	16076	13350	10217	7540	6249	5045	3978	3173	2443	1771
240	- 260	20989	19420	17821	16049	13346	10207	7529	6308	5166	4126	3336	2599	1901
260	- 280	20764	19261	17731	16024	13343	10197	7519	6364	5282	4271	3498	2755	2032
280	- 300	20551	19110	17646	16000	13339	10188	7509	6418	5395	4412	3659	2912	2165
300	- 320	20347	18966	17566	15978	13336	10180	7499	6470	5504	4552	3818	3069	2299
320	- 330	20200	18863	17508	15962	13334	10174	7492	6507	5584	4654	3936	3188	2401
330	- 340	20105	18796	17470	15951	13333	10170	7488	6532	5636	4722	4015	3266	2469
340	- 900	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122
> 900		45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45

Tabelle 58: E-Moduli für Variante 1

Variante 2

Tiefe	E-Moduli [N/mm ²] für 13 Oberflächentemperaturen													
	von	bis	-12,5°C	-7,5°C	-2,5°C	2,5°C	7,5°C	12,5°C	17,5°C	22,5°C	27,5°C	32,5°C	37,5°C	42,5°C
0	- 10	23516	21007	18228	15316	12388	9611	7162	4800	2943	1802	1105	676	413
10	- 20	23233	20784	18095	15278	12383	9596	7146	4871	3052	1907	1193	744	460
20	- 30	22968	20577	17972	15243	12378	9583	7131	4936	3156	2009	1281	812	509
30	- 40	22719	20385	17859	15211	12374	9571	7117	4998	3255	2107	1368	880	558
40	- 50	25531	22942	20159	17237	14045	1085	8067	5740	3803	2501	1651	1078	690
50	- 60	25279	22751	20047	17206	14041	1084	8054	5802	3906	2607	1747	1156	748
60	- 70	25040	22571	19943	17176	14037	1083	8041	5860	4005	2710	1843	1235	807
70	- 80	24814	22401	19844	17148	14033	1082	8029	5916	4101	2811	1938	1313	866
80	- 90	21217	18828	16393	13885	10986	7992	5376	3634	2506	1707	1170	786	512
90	- 100	21003	18676	16308	13862	10983	7984	5366	3666	2563	1766	1226	833	547
100	- 110	20799	18531	16227	13839	10980	7975	5357	3697	2617	1825	1282	881	582
110	- 120	20605	18393	16150	13818	10977	7967	5348	3727	2670	1883	1338	928	619
120	- 130	20419	18261	16077	13798	10974	7960	5339	3756	2722	1940	1394	976	655
140	- 160	20240	18135	16006	13778	10971	7953	5331	3783	2772	1995	1449	1024	692
160	- 180	20069	18014	15939	13760	10969	7946	5323	3810	2822	2051	1504	1073	730
180	- 200	19904	17898	15874	13742	10966	7939	5315	3836	2870	2105	1559	1121	768
200	- 900	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122
> 900		45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45

Tabelle 59: E-Moduli für Variante 2

	Variante 1a			Variante 1b			Variante 1c		
	voller Verbund			guter Verbund			schlechter Verbund		
AÜ:	255.000.000			108.000.000			88.000.000		
B-Zahl:	185.089.200			78.390.720			63.873.920		
LK:	LK1 (6,0 t)	LK2 (10,0 t)	LK3 (12,0 t)	LK1 (6,0 t)	LK2 (10,0 t)	LK3 (12,0 t)	LK1 (6,0 t)	LK2 (10,0 t)	LK3 (12,0 t)
Anteil:	50%	35%	15%	50%	35%	15%	50%	35%	15%
Prog. AÜ:	127.500.000	89.250.000	38.250.000	54.000.000	37.800.000	16.200.000	44.000.000	30.800.000	13.200.000

	Dehnung [‰]			Dehnung [‰]			Dehnung [‰]		
Oberfl.-Temp.	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
[°C]	0,424	0,707	0,849	0,424	0,707	0,849	0,424	0,707	0,849
-12,5	1,41E-02	2,35E-02	2,82E-02	2,01E-02	3,35E-02	4,02E-02	2,12E-02	3,54E-02	4,25E-02
-7,5	1,52E-02	2,53E-02	3,03E-02	2,16E-02	3,60E-02	4,32E-02	2,28E-02	3,79E-02	4,55E-02
-2,5	1,64E-02	2,74E-02	3,29E-02	2,33E-02	3,88E-02	4,66E-02	2,46E-02	4,09E-02	4,91E-02
2,5	1,81E-02	3,02E-02	3,63E-02	2,55E-02	4,25E-02	5,10E-02	2,70E-02	4,49E-02	5,39E-02
7,5	2,14E-02	3,56E-02	4,27E-02	2,98E-02	4,96E-02	5,96E-02	3,14E-02	5,23E-02	6,28E-02
12,5	2,68E-02	4,47E-02	5,36E-02	3,69E-02	6,15E-02	7,38E-02	3,90E-02	6,49E-02	7,79E-02
17,5	3,47E-02	5,78E-02	6,94E-02	4,69E-02	7,81E-02	9,37E-02	4,95E-02	8,25E-02	9,90E-02
22,5	4,11E-02	6,85E-02	8,23E-02	5,41E-02	9,02E-02	1,08E-01	5,70E-02	9,51E-02	1,14E-01
27,5	4,98E-02	8,30E-02	9,97E-02	6,34E-02	1,06E-01	1,27E-01	6,66E-02	1,11E-01	1,33E-01
32,5	6,11E-02	1,02E-01	1,22E-01	7,53E-02	1,25E-01	1,51E-01	7,90E-02	1,32E-01	1,58E-01
37,5	7,38E-02	1,23E-01	1,48E-01	8,83E-02	1,47E-01	1,77E-01	9,24E-02	1,54E-01	1,85E-01
42,5	9,09E-02	1,52E-01	1,82E-01	1,06E-01	1,77E-01	2,12E-01	1,11E-01	1,84E-01	2,21E-01
47,5	1,16E-01	1,94E-01	2,33E-01	1,32E-01	2,21E-01	2,65E-01	1,38E-01	2,30E-01	2,76E-01

	zulässige Lastwechselzahl			zulässige Lastwechselzahl			zulässige Lastwechselzahl		
Oberfl.-Temp.	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
-12,5	1,63E+11	1,91E+10	8,91E+09	3,69E+10	4,33E+09	2,01E+09	2,93E+10	3,44E+09	1,60E+09
-7,5	1,21E+11	1,42E+10	6,60E+09	2,74E+10	3,22E+09	1,50E+09	2,20E+10	2,58E+09	1,20E+09
-2,5	8,61E+10	1,01E+10	4,70E+09	2,00E+10	2,34E+09	1,09E+09	1,59E+10	1,87E+09	8,70E+08
2,5	5,69E+10	6,68E+09	3,11E+09	1,36E+10	1,60E+09	7,43E+08	1,08E+10	1,27E+09	5,91E+08
7,5	2,87E+10	3,37E+09	1,57E+09	7,10E+09	8,34E+08	3,88E+08	5,70E+09	6,68E+08	3,11E+08
12,5	1,10E+10	1,29E+09	6,02E+08	2,90E+09	3,40E+08	1,58E+08	2,30E+09	2,71E+08	1,26E+08
17,5	3,75E+09	4,41E+08	2,05E+08	1,06E+09	1,25E+08	5,81E+07	8,45E+08	9,92E+07	4,62E+07
22,5	1,84E+09	2,15E+08	1,00E+08	5,81E+08	6,82E+07	3,17E+07	4,66E+08	5,47E+07	2,54E+07
27,5	8,21E+08	9,64E+07	4,49E+07	3,00E+08	3,52E+07	1,64E+07	2,43E+08	2,85E+07	1,33E+07
32,5	3,50E+08	4,10E+07	1,91E+07	1,45E+08	1,71E+07	7,94E+06	1,19E+08	1,39E+07	6,48E+06
37,5	1,58E+08	1,86E+07	8,66E+06	7,44E+07	8,74E+06	4,07E+06	6,15E+07	7,22E+06	3,36E+06
42,5	6,59E+07	7,74E+06	3,60E+06	3,47E+07	4,07E+06	1,89E+06	2,89E+07	3,40E+06	1,58E+06
47,5	2,33E+07	2,74E+06	1,27E+06	1,36E+07	1,60E+06	7,45E+05	1,15E+07	1,35E+06	6,29E+05

	vorhandene Lastwechselzahl			vorhandene Lastwechselzahl			vorhandene Lastwechselzahl		
Oberfl.-Temp.	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
-12,5	765.000	535.500	229.500	324.000	226.800	97.200	264.000	184.800	79.200
-7,5	2.932.500	2.052.750	879.750	1.242.000	869.400	372.600	1.012.000	708.400	303.600
-2,5	16.320.000	11.424.000	4.896.000	6.912.000	4.838.400	2.073.600	5.632.000	3.942.400	1.689.600
2,5	22.440.000	15.708.000	6.732.000	9.504.000	6.652.800	2.851.200	7.744.000	5.420.800	2.323.200
7,5	18.742.500	13.119.750	5.622.750	7.938.000	5.556.600	2.381.400	6.468.000	4.527.600	1.940.400
12,5	22.695.000	15.886.500	6.808.500	9.612.000	6.728.400	2.883.600	7.832.000	5.482.400	2.349.600
17,5	17.595.000	12.316.500	5.278.500	7.452.000	5.216.400	2.235.600	6.072.000	4.250.400	1.821.600
22,5	10.327.500	7.229.250	3.098.250	4.374.000	3.061.800	1.312.200	3.564.000	2.494.800	1.069.200
27,5	6.502.500	4.551.750	1.950.750	2.754.000	1.927.800	826.200	2.244.000	1.570.800	673.200
32,5	4.845.000	3.391.500	1.453.500	2.052.000	1.436.400	615.600	1.672.000	1.170.400	501.600
37,5	3.570.000	2.499.000	1.071.000	1.512.000	1.058.400	453.600	1.232.000	862.400	369.600
42,5	382.500	267.750	114.750	162.000	113.400	48.600	132.000	92.400	39.600
47,5	382.500	267.750	114.750	162.000	113.400	48.600	132.000	92.400	39.600
Summe:	127.500.000	89.250.000	38.250.000	54.000.000	37.800.000	16.200.000	44.000.000	30.800.000	13.200.000

	MINER-Anteil			MINER-Anteil			MINER-Anteil		
	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
-12,5	4,69E-06	2,80E-05	2,58E-05	8,79E-06	5,24E-05	4,82E-05	9,00E-06	5,37E-05	4,94E-05
-7,5	2,43E-05	1,45E-04	1,33E-04	4,53E-05	2,70E-04	2,49E-04	4,61E-05	2,75E-04	2,53E-04
-2,5	1,90E-04	1,13E-03	1,04E-03	3,46E-04	2,07E-03	1,90E-03	3,54E-04	2,11E-03	1,94E-03
2,5	3,94E-04	2,35E-03	2,16E-03	6,99E-04	4,17E-03	3,84E-03	7,17E-04	4,27E-03	3,93E-03
7,5	6,54E-04	3,90E-03	3,59E-03	1,12E-03	6,66E-03	6,13E-03	1,14E-03	6,77E-03	6,24E-03
12,5	2,06E-03	1,23E-02	1,13E-02	3,32E-03	1,98E-02	1,82E-02	3,40E-03	2,03E-02	1,87E-02
17,5	4,69E-03	2,80E-02	2,57E-02	7,01E-03	4,18E-02	3,85E-02	7,19E-03	4,29E-02	3,95E-02
22,5	5,63E-03	3,36E-02	3,09E-02	7,53E-03	4,49E-02	4,13E-02	7,65E-03	4,56E-02	4,20E-02
27,5	7,92E-03	4,72E-02	4,35E-02	9,19E-03	5,48E-02	5,05E-02	9,25E-03	5,52E-02	5,08E-02
32,5	1,39E-02	8,26E-02	7,61E-02	1,41E-02	8,42E-02	7,75E-02	1,41E-02	8,40E-02	7,74E-02
37,5	2,25E-02	1,34E-01	1,24E-01	2,03E-02	1,21E-01	1,12E-01	2,00E-02	1,20E-01	1,10E-01
42,5	5,80E-03	3,46E-02	3,19E-02	4,67E-03	2,79E-02	2,57E-02	4,56E-03	2,72E-02	2,51E-02
47,5	1,64E-02	9,78E-02	9,00E-02	1,19E-02	7,09E-02	6,52E-02	1,15E-02	6,83E-02	6,29E-02
Summe:			1,00			1,00			1,00

Tabelle 60: Variante 2, Bestimmung der maximalen Achsübergänge für 3 Verbundvarianten

	Variante 2a			Variante 2b			Variante 2c		
	voller Verbund			guter Verbund			schlechter Verbund		
AÜ:	420.000			230.000			197.000		
B-Zahl:	304.853			166.943			142.990		
LK:	LK1 (6,0 t)	LK2 (10,0 t)	LK3 (12,0 t)	LK1 (6,0 t)	LK2 (10,0 t)	LK3 (12,0 t)	LK1 (6,0 t)	LK2 (10,0 t)	LK3 (12,0 t)
Anteil:	50%	35%	15%	50%	35%	15%	50%	35%	15%
Prog. AÜ:	210.000	147.000	63.000	115.000	80.500	34.500	98.500	68.950	29.550

	Dehnung [‰]			Dehnung [‰]			Dehnung [‰]		
Oberfl.-Temp.	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
[°C]	0,424	0,707	0,849	0,424	0,707	0,849	0,424	0,707	0,849
-12,5	4,72E-02	7,87E-02	9,44E-02	7,19E-02	1,20E-01	1,44E-01	7,77E-02	1,29E-01	1,55E-01
-7,5	5,16E-02	8,59E-02	1,03E-01	7,82E-02	1,30E-01	1,56E-01	8,41E-02	1,40E-01	1,68E-01
-2,5	5,71E-02	9,51E-02	1,14E-01	8,57E-02	1,43E-01	1,71E-01	9,21E-02	1,53E-01	1,84E-01
2,5	6,45E-02	1,07E-01	1,29E-01	9,56E-02	1,59E-01	1,91E-01	1,02E-01	1,71E-01	2,05E-01
7,5	7,68E-02	1,28E-01	1,54E-01	1,12E-01	1,86E-01	2,23E-01	1,19E-01	1,99E-01	2,39E-01
12,5	9,74E-02	1,62E-01	1,95E-01	1,37E-01	2,29E-01	2,75E-01	1,46E-01	2,44E-01	2,93E-01
17,5	1,29E-01	2,16E-01	2,59E-01	1,76E-01	2,93E-01	3,51E-01	1,86E-01	3,11E-01	3,73E-01
22,5	1,68E-01	2,79E-01	3,35E-01	2,18E-01	3,63E-01	4,35E-01	2,30E-01	3,83E-01	4,59E-01
27,5	2,14E-01	3,57E-01	4,29E-01	2,66E-01	4,43E-01	5,31E-01	2,79E-01	4,65E-01	5,77E-01
32,5	2,75E-01	4,59E-01	5,51E-01	3,26E-01	5,44E-01	6,53E-01	3,40E-01	5,67E-01	6,80E-01
37,5	3,49E-01	5,81E-01	6,97E-01	3,97E-01	6,62E-01	7,95E-01	4,11E-01	6,84E-01	8,21E-01
42,5	4,45E-01	7,42E-01	8,90E-01	4,90E-01	8,16E-01	9,80E-01	5,02E-01	8,37E-01	1,00E+00
47,5	5,80E-01	9,66E-01	1,16E+00	6,18E-01	1,03E+00	1,24E+00	6,28E-01	1,05E+00	1,26E+00

	zulässige Lastwechselzahl			zulässige Lastwechselzahl			zulässige Lastwechselzahl		
Oberfl.-Temp.	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
-12,5	1,03E+09	1,21E+08	5,63E+07	1,76E+08	2,07E+07	9,61E+06	1,28E+08	1,50E+07	6,97E+06
-7,5	7,11E+08	8,35E+07	3,88E+07	1,24E+08	1,45E+07	6,77E+06	9,13E+07	1,07E+07	4,99E+06
-2,5	4,64E+08	5,45E+07	2,54E+07	8,43E+07	9,90E+06	4,61E+06	6,24E+07	7,33E+06	3,41E+06
2,5	2,79E+08	3,27E+07	1,52E+07	5,34E+07	6,27E+06	2,92E+06	4,00E+07	4,70E+06	2,19E+06
7,5	1,34E+08	1,57E+07	7,32E+06	2,78E+07	3,26E+06	1,52E+06	2,11E+07	2,48E+06	1,15E+06
12,5	4,95E+07	5,81E+06	2,70E+06	1,17E+07	1,37E+06	6,37E+05	8,92E+06	1,05E+06	4,87E+05
17,5	1,50E+07	1,76E+06	8,17E+05	4,15E+06	4,88E+05	2,27E+05	3,24E+06	3,80E+05	1,77E+05
22,5	5,06E+06	5,94E+05	2,77E+05	1,70E+06	1,99E+05	9,27E+04	1,36E+06	1,59E+05	7,41E+04
27,5	1,80E+06	2,12E+05	9,85E+04	7,34E+05	8,61E+04	4,01E+04	6,01E+05	7,05E+04	3,28E+04
32,5	6,33E+05	7,43E+04	3,46E+04	3,10E+05	3,64E+04	1,69E+04	2,61E+05	3,07E+04	1,43E+04
37,5	2,35E+05	2,75E+04	1,28E+04	1,36E+05	1,59E+04	7,41E+03	1,18E+05	1,39E+04	6,46E+03
42,5	8,42E+04	9,89E+03	4,60E+03	5,65E+04	6,63E+03	3,08E+03	5,09E+04	5,97E+03	2,78E+03
47,5	2,78E+04	3,27E+03	1,52E+03	2,14E+04	2,51E+03	1,17E+03	1,99E+04	2,33E+03	1,09E+03

	vorhandene Lastwechselzahl			vorhandene Lastwechselzahl			vorhandene Lastwechselzahl		
Oberfl.-Temp.	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
-12,5	1.260	882	378	690	483	207	591	414	177
-7,5	4.830	3.381	1.449	2.645	1.852	794	2.266	1.586	680
-2,5	26.880	18.816	8.064	14.720	10.304	4.416	12.608	8.826	3.782
2,5	36.960	25.872	11.088	20.240	14.168	6.072	17.336	12.135	5.201
7,5	30.870	21.609	9.261	16.905	11.834	5.072	14.480	10.136	4.344
12,5	37.380	26.166	11.214	20.470	14.329	6.141	17.533	12.273	5.260
17,5	28.980	20.286	8.694	15.870	11.109	4.761	13.593	9.515	4.078
22,5	17.010	11.907	5.103	9.315	6.521	2.795	7.979	5.585	2.394
27,5	10.710	7.497	3.213	5.865	4.106	1.760	5.024	3.516	1.507
32,5	7.980	5.586	2.394	4.370	3.059	1.311	3.743	2.620	1.123
37,5	5.880	4.116	1.764	3.220	2.254	966	2.758	1.931	827
42,5	630	441	189	345	242	104	296	207	89
47,5	630	441	189	345	242	104	296	207	89
Summe:	210.000	147.000	63.000	115.000	80.500	34.500	98.500	68.950	29.550

	MINER-Anteil			MINER-Anteil			MINER-Anteil		
	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t	6,0 t	10,0 t	12,0 t
-12,5	1,22E-06	7,29E-06	6,71E-06	3,92E-06	2,34E-05	2,15E-05	4,63E-06	2,76E-05	2,54E-05
-7,5	6,79E-06	4,05E-05	3,73E-05	2,14E-05	1,27E-04	1,17E-04	2,48E-05	1,48E-04	1,36E-04
-2,5	5,79E-05	3,45E-04	3,18E-04	1,75E-04	1,04E-03	9,59E-04	2,02E-04	1,20E-03	1,11E-03
2,5	1,33E-04	7,91E-04	7,28E-04	3,79E-04	2,26E-03	2,08E-03	4,33E-04	2,58E-03	2,38E-03
7,5	2,30E-04	1,37E-03	1,27E-03	6,08E-04	3,63E-03	3,34E-03	6,87E-04	4,09E-03	3,77E-03
12,5	7,56E-04	4,51E-03	4,15E-03	1,76E-03	1,05E-02	9,64E-03	1,97E-03	1,17E-02	1,08E-02
17,5	1,94E-03	1,16E-02	1,06E-02	3,82E-03	2,28E-02	2,10E-02	4,20E-03	2,50E-02	2,30E-02
22,5	3,36E-03	2,00E-02	1,84E-02	5,49E-03	3,27E-02	3,01E-02	5,88E-03	3,51E-02	3,23E-02
27,5	5,94E-03	3,54E-02	3,26E-02	7,99E-03	4,77E-02	4,39E-02	8,36E-03	4,99E-02	4,59E-02
32,5	1,26E-02	7,52E-02	6,93E-02	1,41E-02	8,40E-02	7,74E-02	1,43E-02	8,55E-02	7,87E-02
37,5	2,51E-02	1,49E-01	1,38E-01	2,37E-02	1,42E-01	1,30E-01	2,33E-02	1,39E-01	1,28E-01
42,5	7,48E-03	4,46E-02	4,11E-02	6,11E-03	3,64E-02	3,36E-02	5,81E-03	3,46E-02	3,19E-02
47,5	2,26E-02	1,35E-01	1,24E-01	1,62E-02	9,63E-02	8,87E-02	1,49E-02	8,86E-02	8,16E-02
		Summe:	1,00		Summe:	1,00		Summe:	1,00

Tabelle 61: Variante 2, Bestimmung der maximalen Achsübergänge für 3 Verbundvarianten

Radialspannung [N/mm ²]			
Variante 1a: voller Verbund			
Tiefe	-12,5°C	17,5°C	47,5°C
0	-1,702	-1,450	-0,750
40	-1,101	-0,964	-0,645
40	-1,173	-1,022	-0,671
120	-0,267	-0,259	-0,346
120	-0,272	-0,264	-0,344
340	1,023	0,930	1,001

Radialspannung [N/mm ²]			
Variante 2a: voller Verbund			
Tiefe	-12,5°C	17,5°C	47,5°C
0	-4,009	-3,210	-1,238
40	-1,812	-1,392	-0,799
40	-1,978	-1,514	-0,868
80	0,145	0,349	-0,002
80	0,081	0,134	-0,165
160	3,380	2,433	1,393

Radialspannung [N/mm ²]			
Variante 1b: guter Verbund			
Tiefe	-12,5°C	17,5°C	47,5°C
0	-1,359	-1,208	-0,701
40	-0,374	-0,466	-0,565
40	-1,560	-1,257	-0,654
120	0,377	0,255	-0,132
120	-1,329	-1,063	-0,595
340	1,458	1,256	1,137

Radialspannung [N/mm ²]			
Variante 2b: guter Verbund			
Tiefe	-12,5°C	17,5°C	47,5°C
0	-4,356	-3,389	-1,195
40	0,617	0,148	-0,616
40	-3,470	-2,431	-0,880
80	1,815	1,450	0,208
80	-3,047	-1,589	-0,420
160	5,143	3,287	1,464

Radialspannung [N/mm ²]			
Variante 1c: schlechter Verbund			
Tiefe	-12,5°C	17,5°C	47,5°C
0	-1,251	-1,156	-0,697
40	-0,198	-0,355	-0,545
40	-1,649	-1,300	-0,643
120	0,447	0,358	-0,044
120	-1,495	-1,222	-0,683
340	1,540	1,326	1,183

Radialspannung [N/mm ²]			
Variante 2c: schlechter Verbund			
Tiefe	-12,5°C	17,5°C	47,5°C
0	-4,284	-3,424	-1,199
40	1,334	0,562	-0,568
40	-3,997	-2,655	-0,855
80	2,022	1,751	0,335
80	-3,745	-2,043	-0,529
160	5,551	3,483	1,481

Tabelle 62: berechnete Radialspannungen in der Lastachse für Variante 1 und 2