

# Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 174

**bast**

# Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

von

Bernd Dudenhöfer  
Philipp Rückert

ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH  
Berlin

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 174**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 15.0567**  
Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

**Fachbetreuung**  
Manfred Eilers

**Referat**  
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9315  
ISBN 978-3-95606-655-9

Bergisch Gladbach, Januar 2022

## Kurzfassung – Abstract

### Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Die im Straßenbau verwendeten Ausgangsstoffe unterliegen hohen Standards, welche in den europäischen Normen bzw. den nationalen Umsetzungen z.B. in der TL Bitumen-StB oder der TL Gestein-StB festgehalten sind. Die Anforderungen der HANV-Schicht an das verwendete Gestein, die das Traggerüst beeinflussen, sind mit den halbstarren Deckschichten bereits hinreichend im M HD optimiert worden. Ebenso wurden die Bindemittel größtenteils aus der Bauweise übernommen. Für Reaktionsharze gibt es kein Regelwerk auf diesem Rechtsniveau, welches die Eigenschaften genau spezifiziert. Dabei steht bei der HANV-Bauweise ausgehend von der volumetrischen Betrachtung dem konventionell verwendeten bitumenhaltigen Bindemittel bzw. Bitumen nur eine sekundäre Aufgabe im viskoelastischen Verhalten zu. Primär wird die Schicht von den Eigenschaften des Verfüllbaustoffes geprägt, eine Vermutung, die bisher nur auf Erfahrungen und nicht auf quantitativen Nachweisen beruht.

Durch Untersuchungen an unterschiedlichen Reaktionsharzen und resultierenden HANV-Systemen konnte der Einfluss der Verfüllbaustoffe im ausgehärteten als auch im aushärtenden Zustand auf die Performanceeigenschaften der Abdichtungsschicht bzw. das Zusammenspiel mit dem Asphalttraggerüst quantifiziert werden.

Dementsprechend können je nach zu erwartender Beanspruchungsart (hohe Verformungen oder mittragender Wirkung) die Verfüllbaustoffe optimiert werden. Dies erlaubt eine nachhaltige Qualität der Abdichtungsschicht auf Stahlbeton und Stahlbrücken.

### Plastic seals under bridge decks

The starting materials used in road construction are subject to high standards, which are set out in European standards and / or national transpositions E.g. in the TL Bitumen-StB or the TL Gestein-StB are held. The requirements of the HANV layer on the used rock, which influence the framework, have already been sufficiently optimized in the M HD with the semi-rigid cover layers. Likewise, the binders were largely taken over from the construction. For reaction resins there is no set of rules on this legal level which specifies the properties exactly. In the HANV design, based on the volumetric consideration, the conventionally used bitumen-containing binder or bitumen has only a secondary task in the viscoelastic behaviour. Primarily, the layer is characterized by the properties of the filling material, a conjecture which so far relies only on experience and not on quantitative evidence.

By investigating different reaction resins and the resulting HANV systems, it was possible to quantify the influence of the filling materials in the hardened as well as in the hardened state on the performance characteristics of the sealing layer or the interaction with the asphalt support framework.

Accordingly, depending on the expected type of stress (high deformations or entrainment of the effect) the filling materials can be optimized. This allows a sustainable quality of the sealing layer on reinforced concrete and steel bridges.

## Summary

### Plastic seals under bridge decks

#### 1 Task

In the 1990s, considerations were raised as to an alternative to the conventional sealing systems according to ZTV-BEL-B, Parts 1-3 [5, supra] (Today ZTV-ING - Part 7)<sup>1</sup>. The repair system should be comparable in its performance to the regular construction methods, but in an extremely short construction time feasible. The production of a fully functional and durable sealing layer should be weather-independent if possible. The period for the completion of a repair construction site was 8 to 12 hours and for a renewal measure a maximum of 3 days, incl. The installation of all asphalt layers and required ancillary work. This would make it superior to the conventional sealing systems for repair and renewal measures, which are basically designed for new construction measures.

The basic idea for the new construction method described here arose from the successful field testing of a special covering for bus stops on bridges - drainage asphalt, filled with reaction resin binder (System Statiflex)<sup>2</sup>. This system was based on a conventional seal according to ZTV-BEL-B<sup>1</sup>, as a protective and covering layer, an open-pored asphalt 0/11 was incorporated, in the pores of which a reaction resin was slurried. The advantage of this coating was compared to conventional asphalt significantly higher deformation resistance and compared to semi-rigid outer layers more favorable behavior under vibration stress. Deformation damage at bus stops or in back-up areas of lighting installations on bridges, which were virtually unavoidable in conventional mastic asphalt construction, could be effectively pre-vented with this construction method.

Since 1999, a number of bridges have been repaired using the VOPA construction method, providing proven experience in the required manufacturing and durability constraints.

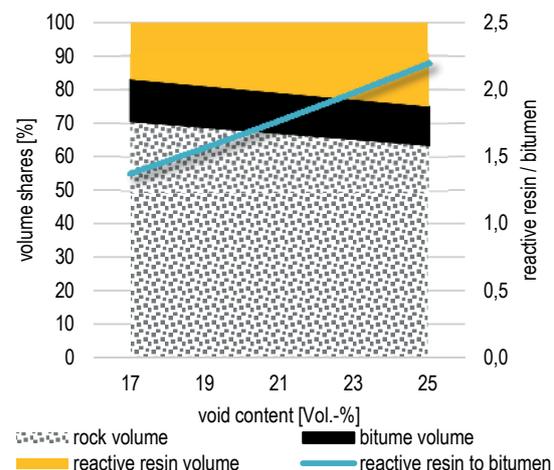
In 2010, a research project on the subject "Hollow asphalt support structure with subsequent encapsulation as a rapid sealing system on bridges (HANV)" was completed by the Federal Institute for Materials Research and Test-ing<sup>4</sup>. The main goal of this project was to evaluate the performance of the system in bridging cracks and the influence of different installation conditions on the layer composite. The project concludes with the finding that during the test with the filling material used at that time, crack bridging up to a dynamic crack movement of 0.1 mm at -20 ° C is possible.

In the "Guidelines for the Manufacture of Cavity Roofing Systems with Subsequent Filling for Concrete Structural Concrete Structures (H HANV)"<sup>5</sup> All findings from completed construction projects were compiled and made a first step towards a standard construction. Not only initial

recommendations for the properties and composition of the HANV coating are listed, but also for the filling materials and the asphalt-rich framework.

In this research project technological and sealing advantages had to be validated.

The raw materials used in road construction are subject to high standards, which in the European standards or national implementations E.g. in the TL Bitumen-StB or the TL Gestein-StB are held. The demands on the rock, which influence the framework, have already been sufficiently optimized with the semi-rigid cover layers<sup>6</sup>. Likewise, the binders were largely taken over from the construction. For reaction resins, there is no set of rules on this legal level that specifies the properties exactly. The HANV design is based on volumetric considerations (see Fig. 1) the conventionally used bitumen-containing binder or bitumen only a secondary task too. Primarily, the layer should be shaped by the properties of the filler, a presumption that has so far relied only on experience and not on quantitative evidence.



**Fig. 1:** Consider the volume fraction of a HANV layer (ignoring the stabilizing additives) and the ratio of filler / bitumen according to the recommended composition of H HANV<sup>5</sup>.

#### 2 Method

The research objective was to optimize the existing concrete waterproofing system by specifying the processing, curing and performance characteristics of the reaction resins for the shortest possible execution time. On the other hand, the basic application possibilities for the sealing of steel bridges should be explored, where an elastic sealing layer with defined characteristic values could possibly provide a static contribution to the load transfer.

For this purpose investigations were carried out which should quantify the influence of three backfill materials on the layer properties in order to derive an optimal system.

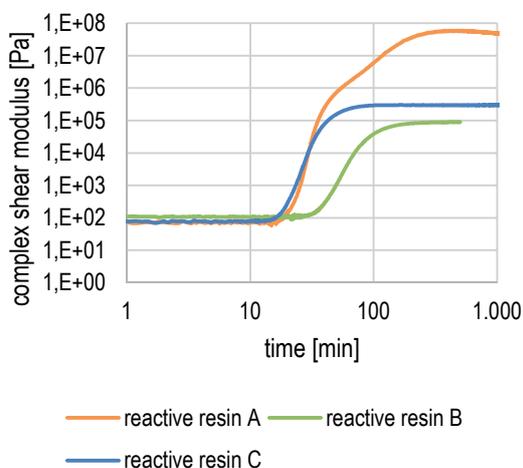
In the first step, the backfill materials were specified in terms of cure behavior and rheological properties in a temperature range of  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which can be considered at the service temperature of the HANV layer. On the basis of results from basic tests and further investigations, the size of the influence of the properties of the filling building material on the HANV layer was derived.

### 3 Results

#### 3.1 Curing behavior and rheological behavior

To assess the crosslinking reaction, experiments were carried out at a constant ambient temperature of  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . These three temperature steps should simulate a lowest, a medium and a high temperature of the ATG or the environment during flooding or hardening. The temperature was held constant throughout the test period to measure the isothermal reaction kinetics with a dynamic shear rheometer (see Fig. 2).

From the measurements, it could be seen that the filling material A and C have a nearly comparable reaction kinetics, while the filling material B requires a longer time until the first crosslinking reactions, which are accompanied by an increase in rigidity. The initial plateau of the compl. Shear modulus depends on the temperature. The lower the initial stiffness, the better the penetration behavior of the filling materials into the asphalt support framework is to be evaluated. At the end of the crosslinking reaction, the fillers form the characteristic final strength which depends on the temperature and loading time. Taking into account the phase angle, it can be stated that the filling structure A has a predominantly elastic behavior in association with a high rigidity and the filling material C has a predominantly viscous behavior along with a low rigidity. The backfill B has an intermediate rheological behavior.

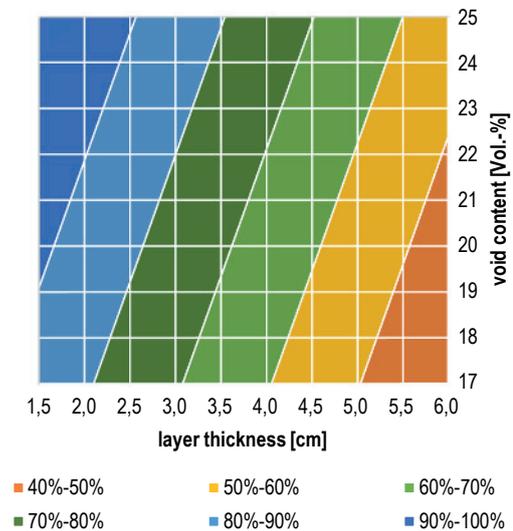


**Fig. 2:** Isothermal reaction kinetics of the three reactive resin at a temperature of  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

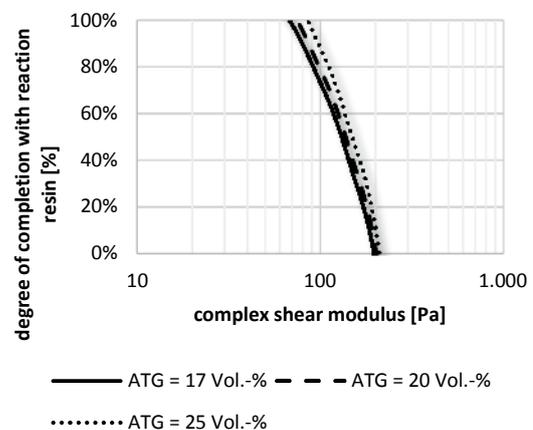
As the temperature decreases (see Figure 3), the stiffness difference is negated, with the more viscous behavior of the fillers B and C outweighing A. Compared to a polymer-modified bitumen 25 / 55-55 A, the fillers have a significantly higher stiffness and more elastic behavior.

#### 3.2 Quantification of the effects on the properties of the layer

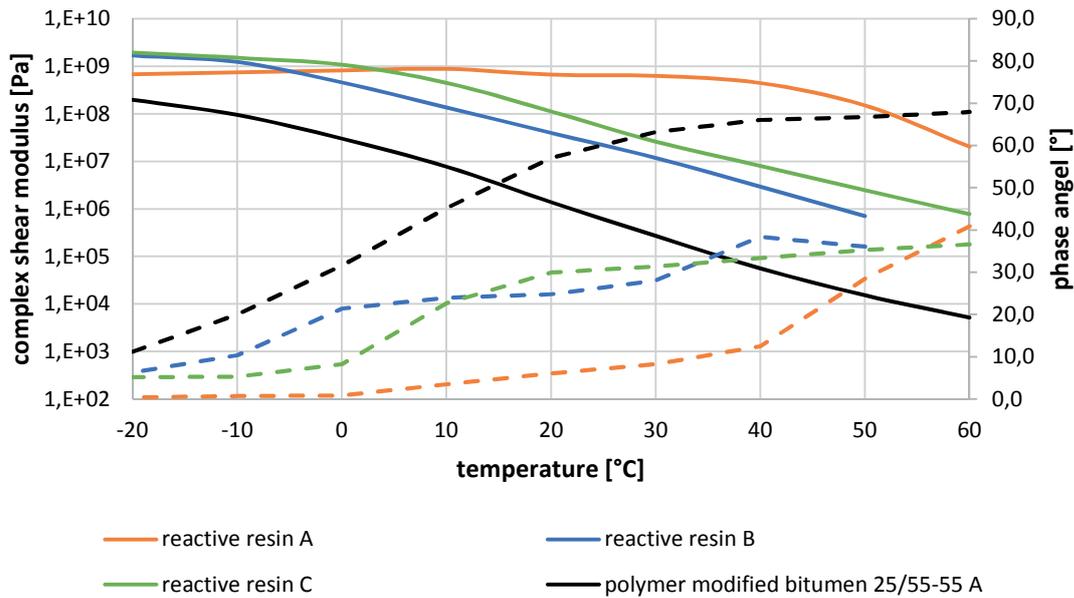
Multiple regression analyzes were carried out to quantify different influences resulting from the building materials and building material mixtures of the coating on the characteristics of the overall system. With the help of the statistical analysis the influence on the success of the filling of the layer as well as the bond, the modulus of elasticity and the low temperature behavior should be quantified. The results concerning the degree of filling and the adhesive bond to the asphalt interlayer are presented below.



**Fig. 4** Influence of the void content and the layer thickness of the asphalt support framework on the degree of filling with reaction resin (with a complete shear modulus of  $90\text{ Pa}$ )



**Fig. 5:** Influence of the complex shear modulus on the degree of completion with reaction resin (with a layer thickness of  $2\text{ cm}$ )

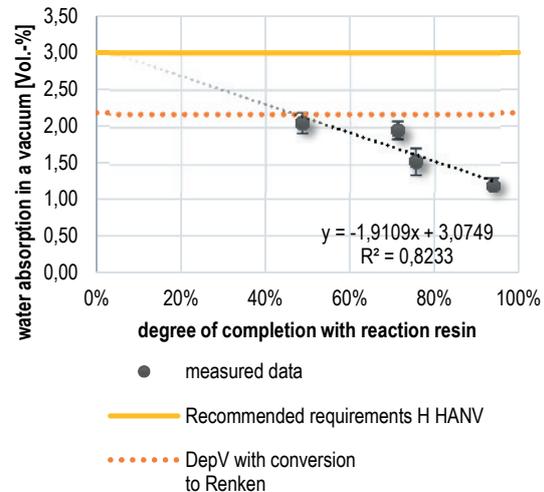


**Fig. 3:** Isochrones of the reaction resins after curing for 7 days at 23 ° C and 50% rel. Humidity and characteristic values of a polymer-modified bitumen 25 / 55-55 A (solid lines: complete shear modulus, dashed lines: phase angle)

With a layer thickness of 2 cm, a complex shear modulus of less than 100 Pa is required, regardless of the void content of the asphalt support framework, in order to ensure a degree of completion of 100%. With decreasing temperature, the stiffness of the reaction resins increases and leads to an exponential decrease in the degree of completion. In the investigations carried out on the reaction resins and the fillability, only the statement can be made that a minimum temperature of 20 ° C in the asphalt support structure and the filling material must be present.

In order to quantify the influence of the degree of filling on the permeability of the layer, the water absorption was examined under vacuum on remnants of two test pieces of flexural strength with the filling material C. The results are summarized below and will be interpreted afterwards.

With increasing degree of filling with the filling building material, the water absorption decreases in a vacuum. The H HANV recommends a maximum water absorption of 3.0% by volume in the basic test. The Landfill Ordinance also shows a maximum level of 3.0% by volume for the asphalt waterproofing, when the void content was calculated using the spatial density and bulk density. According to Renken, a calculated void content of 3.0% by volume corresponds to approximately 2.2% by volume for water absorption under vacuum<sup>7</sup>. These two empirical values were added to Figure 6.

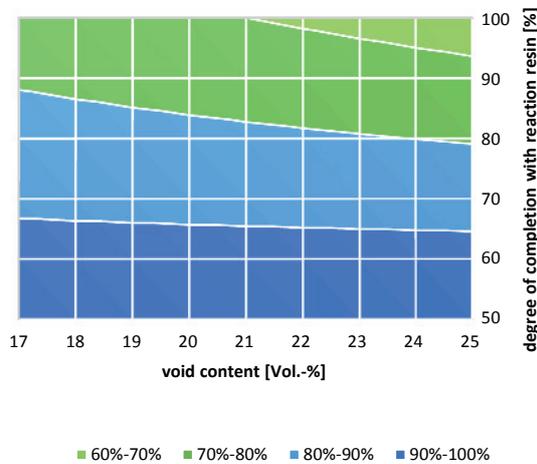


**Fig. 6:** Relation between the degree of filling with the filling material and the water absorption in a vacuum

According to H HANV, in the present case example, a degree of completion of approximately 10% with the filling building material would still be considered sufficient if the data were extrapolated. Taking into account the adjusted requirements of the Landfill Ordinance, at least 50% would be required to ensure a tight sealant layer. In the view of the authors, taking into account the sensitivity of the test, a minimum degree of completion of about 75% with the filling building material, together with a water absorption of not more than 2% by volume, would be required in order to produce a water-impermeable layer.

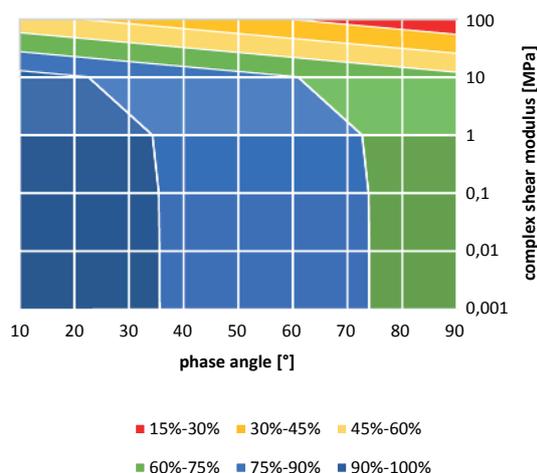
The composite to the asphalt interlayer / topcoat ensures transmission of shear forces and affects the durability of

the layer. The investigations should clarify how sensitively the composite depends on certain characteristics.



**Fig. 7:** Influence of the asphalt skeleton and the degree of filling with the filling material on the tearing resistance to the asphalt intermediate layer / top layer (100% = 1.4 MPa, 75% = 1.1 MPa; assumption: complete shear modulus of 150 MPa and a phase angle of 23, 5 ° in the cured state, complete shear modulus of 0.2 MPa and a phase angle of 28.5 ° just before the revision)

According to the sensitivity analysis increases the tear strength to the asphalt interlayer / topcoat with higher degree of filling and low void content. Overall, the statement can be made that, taking into account the recommended range of void content after 5, no significant changes are associated with a change in tear resistance of on average 0.06 MPa. A span of the degree of completion of 50% leads to an absolute change of on average 0.5 MPa.



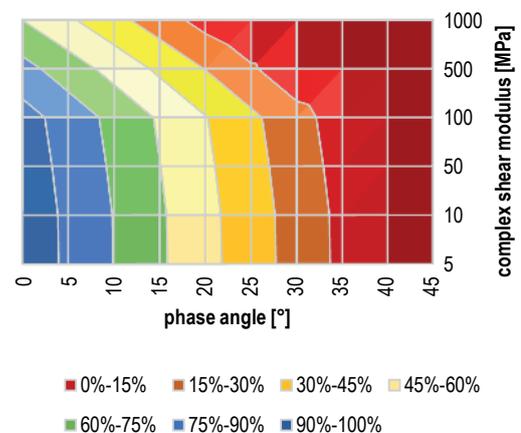
**Fig. 8:** Influence of the degree of crosslinking of the filling material on the breaking strength to the asphalt intermediate layer / top layer (100% = 1.4 MPa, 25% = 0.2 MPa; assumption: void content of the ATG of 20% by volume, proportion of the air of 0 vol % shear modulus of 150 MPa and a phase angle of 23.5 ° in the hardened state)

To improve the bond between the HANV layer and the layer applied over it, a low complex shear modulus, accompanied by an elastic removal of the forces (low phase angle), should be aimed for. In the investigated fillers, the elastic behavior increases with increasing crosslinking reaction and higher complex shear modulus. This contradiction between the reaction kinetics and the result of the case study can be interpreted as follows. Experience has shown that a bond is only possible if the revision begins before the backfill has completely hardened. For this advanced cure is a high complex shear modulus. Too rapid a revision, the Verfüllbaustoff usually still too high viscosity and can be "pulled out" by thixotropic effects in conjunction with the capillaries of the layer above it and the temperature of the HANV layer. This has already been observed several times in laboratory tests by leakage of the filling material at the surface of the asphalt intermediate layer. This aspect is described by the phase angle in the reaction kinetics.

In the present case, a tear resistance of 0.7 MPa is achieved if a level of more than 60% is maintained. In comparison to the changes of the asphalt support framework, the reaction kinetics with a possible margin of 0.7 MPa takes on a higher status.

However, it could be stated that the rheological properties in the hardened state have a greater influence on the bond with an asphalt interlayer / topcoat (see Figure 10). In the present case, tear strengths between 0 and 3.6 MPa are to be recorded. A decreasing phase angle (more elastic behavior) promotes the level more clearly than a high rigidity (complete shear modulus).

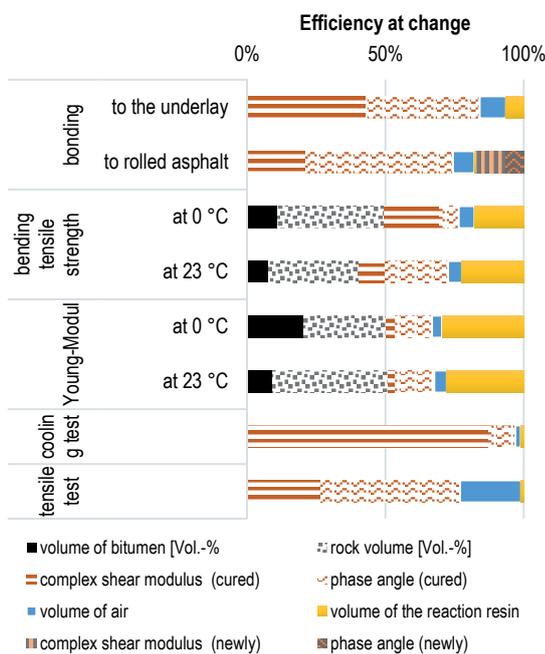
In summary, it can be stated that the bond to the overlying layer is also significantly dependent on the properties of the filling building material.



**Fig. 9:** Influence of the rheological properties of the filling material on the tear-resistance to the asphalt intermediate layer / top layer (100% = 3.7 MPa, 0% = 0.0 MPa, assumption: void content of the ATG of 20% by volume, proportion of the air of 0 vol.-%, complete shear modulus of 0.2 MPa and a phase angle of 28.5 ° just before the revision)

## 4 Summary

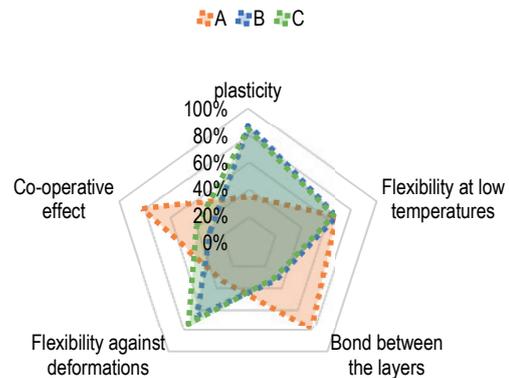
On the basis of the investigations, it is possible to assume the following relationships of the characteristic values considered (see Figure 10). It is assumed that binder properties also influence the results. However, this is much lower estimated than that of Verfüllbaustoffes. The reason for this assumption is that the rheological properties of bitumen and bitumen-containing binders have significantly more viscous properties and lower stiffnesses (see Figure 3). In the considerations, the binder properties could be assumed to be constant, since each sample contains the same type of binder 25 / 55-55 A from the same tank and the same delivery batch.



**Fig. 10:** Standardized representation of possible influences from building materials and building material mixtures on the characteristic values of the HANV system

Overall, it can be assumed that the properties of the filling building material greatly affect the characteristics of the HANV layer. The properties of the ATG or the success of filling only appear to influence the characteristic values secondarily. In terms of process reliability and optimization of the construction method, it makes sense to further characterize and specify the fillers in terms of their use behavior.

The three reaction resins tested showed their qualities in different areas. These can be broadly differentiated into processability, cold flexibility, layer bonding, flexibility with respect to deformation and the co-contributing effect. The results were summarized semi-quantitatively according to the fillers and their properties and will be discussed below.



**Fig. 11:** Semi-quantitative assessment of the three investigated filling materials

### Processability

The filling material B and C have not only a much lower level than the filling material A in viscosity. Also, when filling test plates, a significantly better penetrability was noticeable.

### Flexibility at low temperatures

Based on the rheological properties, a higher stiffness in combination with a higher phase angle could be demonstrated for the fillers B and C. In terms of crack bridging ability, these aspects were negated compared to the filling material A. Therefore, comparable behavior at low temperatures is assumed.

### Layer composite and co-sustaining effect

In both cases, a high rigidity and elasticity of the reaction resin base is an advantage. Accordingly, the filler material A is clearly superior to the variants B and C.

### Flexibility against deformation

If deformations at medium and higher service temperatures are desired to involve deformation of the design then the filler C exhibited the best performance. This can occur especially with steel bridge constructions.

<sup>1</sup> Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen auf Beton – ZTV-BEL-B Teil 1 - 3

<sup>2</sup> Peter Weyer: Standfeste Sonderbeläge Straßen und Tiefbau Heft 3/98

<sup>3</sup> H. Neuß, R. Stratmann, T. Sikinger, N. Simmler, H. Pucker und P. Hatebur: Kompletterneuerung einer Brückenabdichtung an einem Wochenende, Straße + Autobahn 8/2003

<sup>4</sup> FE Nr. 15.431/2006/HRB: Hohlraumreiches Asphalttraggerüst mit nachträglichem Verguss als schnelles Abdichtungssystem auf Brücken (HANV), Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, AG Bituminöse Stoffe und Abdichtungstechnik

<sup>5</sup> FGSV Nr. 776: Hinweise für die Herstellung von Abdichtungssystemen aus Hohlraumreichen Asphalttraggerüsten mit Nachträglicher Verfüllung für Ingenieurbauten aus Beton - H HANV, Ausgabe 2015

<sup>6</sup> FGSV Nr. 729: Merkblatt für die Herstellung von Halbstarren Deckschichten – M HD, Ausgabe 2010

<sup>7</sup> Dr.-Ing. P. Renken: Substitution von Lösemitteln bei der Bestimmung der Rohdichte, erschienen in Bitumen 1/93

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	10	<b>5</b>	<b>Quantifizierung der Einflüsse auf die Eigenschaften der Schicht</b> .....	54
<b>2</b>	<b>Problemstellung</b> .....	11	5.1	Allgemeine Betrachtungen und Vorgehensweise .....	54
<b>3</b>	<b>Konzept der Untersuchungen</b> .....	12	5.2	Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz .....	56
<b>4</b>	<b>Optimierung der Baustoffe- und Baustoffgemische</b> .....	12	5.3	Haftverbund zur Betonunterlage .....	59
4.1	Asphaltträgergestüt .....	12	5.4	Haftverbund zur Asphaltzwischen- schicht/-deckschicht .....	60
4.1.1	Zusammensetzung und volumetrische Kennwerte .....	12	5.5	Biegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul ..	63
4.1.2	Prüfung der Verfüllbarkeit über die Durchlässigkeit .....	16	5.6	Verhalten bei tiefen Temperaturen – Abkühl- und Zugversuch .....	71
4.1.3	Verhalten bei tiefen Temperaturen .....	16	5.7	Zusammenfassung und Validierung .....	74
4.1.4	Resümee .....	17	<b>6</b>	<b>Statische Wirkung einer HANV-Schicht</b> ..	77
4.2	Verfüllbaustoffe .....	18	<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen</b> ..	79
4.2.1	Grundcharakterisierung nach H HANV .....	18	7.1	Einfluss der Verfüllbaustoffe auf die Eigenschaften der HANV-Schicht .....	79
4.2.2	Reaktionskinetik in Abhängigkeit von der Temperatur .....	20	7.2	Empfehlungen für die Praxis .....	80
4.2.3	Rheologisches Verhalten bei unterschiedlichen Aushärtungsbedingungen .....	31	7.3	Weiterer Forschungsbedarf .....	83
4.2.4	Schnellverfahren zur Prüfung der Erhärtungseigenschaften vor Ort .....	35	<b>8</b>	<b>Literatur</b> .....	84
4.2.5	Resümee .....	40	<b>Bilder</b> .....	86	
4.3	Untersuchungen an der HANV-Schicht .....	40	<b>Tabellen</b> .....	89	
4.3.1	Auswahl der Komponenten und Festlegungen für die Durchführung .....	40			
4.3.2	Herstellung der Probekörper .....	40			
4.3.3	Verfüllbarkeit des ATG .....	41			
4.3.4	Eigenschaften der Schicht nach H HANV .....	43			
4.3.5	Weitergehende Untersuchungen zu den Eigenschaften der HANV-Schicht .....	45			
4.3.6	Rissüberbrückung einer HANV-Schicht .....	49			
4.3.7	Abkühlversuch und Zugfestigkeitsreserven .....	51			
4.3.8	Resümee .....	53			

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:

<https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

## 1 Einleitung

Die seit Jahren zunehmende Anzahl der Kraftfahrzeuge, hierbei insbesondere der Fahrzeuge des Schwerlastverkehrs unter Beachtung der zukünftig noch stärkeren Steigerung des Verkehrsaufkommens infolge der Osterweiterung der EU, führt gleichermaßen zu einer Erhöhung der Beanspruchung unseres Straßennetzes. Fahrbahnen müssen dementsprechend in kürzeren Intervallen instandgesetzt werden oder einen höheren Verformungs- und Verschleißwiderstand aufweisen als bisher.

Die aktuelle Verkehrsmenge und die Entwicklung des Wirtschaftsverkehrs führen sukzessive zu immer stärkeren Belastungen der Verkehrswege an allen Werktagen „rund um die Uhr“.

Diese Entwicklung hat zur Folge, dass es sowohl in Ballungsräumen, aber auch in ländlichen Regionen mit einem sehr weitmaschigen Netz an leistungsfähigen Fernstraßen, immer schwieriger wird, ausreichende Sperrzeiten für notwendige Instandsetzungsmaßnahmen an Straßen und Ingenieurbauwerken durchzusetzen.

Von politischer Seite ist jedes Mal ein Abwägungsprozess erforderlich, inwieweit die volkswirtschaftlichen Beeinträchtigungen durch Baumaßnahmen unter Beachtung der Gewährleistung der Verkehrssicherungspflicht zu vertreten sind. Diese Überlegungen führen oft dazu, dass zunächst kleinere Schadstellen, besonders an Ingenieurbauwerken, nicht in der erforderlichen technischen Qualität dauerhaft instandgesetzt werden können, sondern nur eine kurzfristige provisorische Reparatur erhalten.

Arbeiten am Fahrbahnbelag nach ZTV-ING im Zuge von baulichen Erhaltungs- oder Reparaturarbeiten an Brücken-, Tunnel- oder Trogbauwerken, bei denen auch die Dichtungsschicht erneuert werden muss, sind für den Verkehrsteilnehmer immer mit besonders langen Verkehrseinschränkungen verbunden [1]. Die regelgerechte Ausführung der Abdichtung erfordert durch die Vielzahl der Arbeitsgänge, bei denen je nach Art der eingesetzten Stoffe Wartezeiten einzuhalten sind, einen großen Zeitbedarf. Überdies sind viele dieser Arbeitsgänge nur bei speziellen Witterungsbedingungen auszuführen, so dass zusätzliche Wartezeiten entstehen. Dies hat in der Summe dazu geführt, dass diese oft kleinen Instandsetzungsflächen keine Dichtungsschicht mehr erhalten haben, wodurch aber langfristig die Bauwerkssubstanz gefährdet wird.

Diese Ausgangssituation war in den 1990er Jahren Grundlage für Überlegungen, bezüglich einer Alternative zu den konventionellen Abdichtungssystemen nach ZTV-BEL-B, Teile 1 - 3 [5 u.a.] (Heute ZTV-ING - Teil 7) [2]. Das Instandsetzungssystem sollte in seiner Leistungsfähigkeit den Regelbauweisen gleichwertig, jedoch in einer extrem verkürzten Bauzeit realisierbar sein. Die Herstellung einer voll funktionsfähigen und dauerhaften Dichtungsschicht sollte nach Möglichkeit witterungsunabhängiger erfolgen können. Als Zeitraum für die Abwicklung einer Reparaturbaustelle wurden 8 – 12 Stunden angestrebt und für eine Erneuerungsmaßnahme maximal 3 Tage, inklusive dem Einbau aller Asphaltsschichten und erforderlicher Nebenarbeiten. Damit wäre es bei Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen den konventionellen Abdichtungssystemen überlegen, welche im Grunde nach für Neubaumaßnahmen konzipiert sind.

Der Grundgedanke für die hier beschriebene neue Bauweise entstand aus der erfolgreichen Praxiserprobung eines Sonderbelages für Bushaltestellen auf Brücken – Drainasphalt, verfüllt mit Reaktionsharzbindemittel (System Statiflex) [3] [4]. In diesem System wurde auf einer konventionellen Abdichtung nach ZTV-BEL-B [2] als Schutz- und Deckschicht ein offenporiger Asphalt 0/11 eingebaut, in dessen Poren ein Reaktionsharz eingeschlämmt wurde. Der Vorteil dieses Belages war eine gegenüber herkömmlichem Asphalt deutlich höhere Verformungsbeständigkeit und ein im Vergleich zu halbstarren Deckschichten günstigeres Verhalten bei Schwingungsbeanspruchung. Verformungsschäden an Bushaltestellen oder in

Rückstaubereichen von Lichtsignalanlagen auf Brücken, die in konventioneller Gussasphaltbauweise nahezu nicht zu vermeiden waren, ließen sich mit dieser Bauweise wirkungsvoll verhindern.

Unter dem Arbeitstitel „Verfüllter offenporiger Asphalt (VOPA), eine kombinierte Dichtungs- und Schutzschicht für Fahrbahnbeläge auf Betonbrücken, in Tunneln und Trogbauwerken“ wurde im Jahre 1998 von der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung ein Untersuchungsauftrag an die ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH erteilt. Es konnte erfolgreich geprüft werden, dass ein verfüllter offenporiger Asphalt, der gegenüber dem Belag für Bushaltestellen in reduzierter Dicke und angepasstem Größtkorn unmittelbar auf dem Beton eingebaut wird, die Funktion einer Dichtungsschicht übernehmen kann.

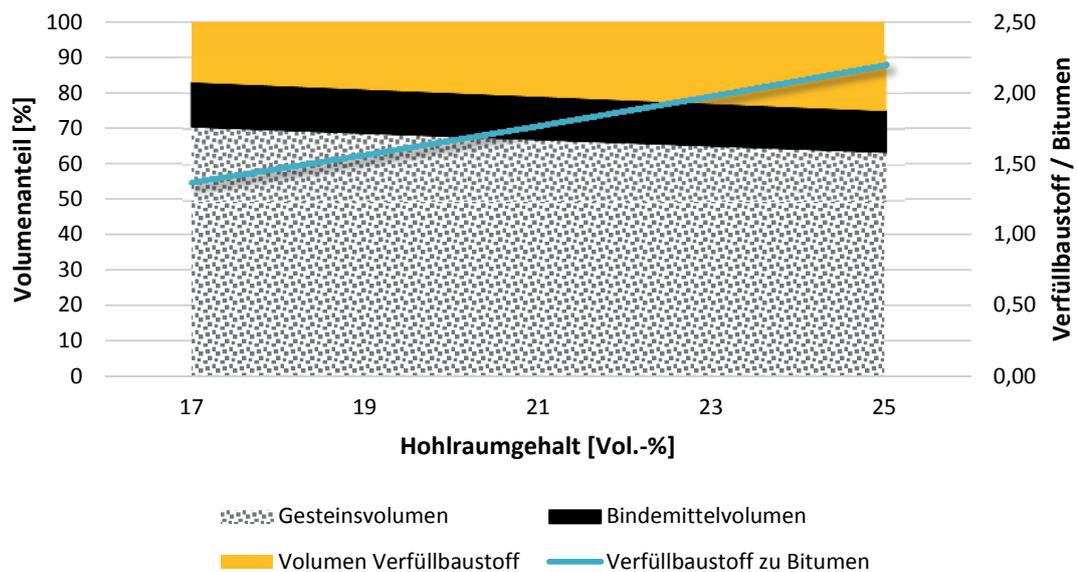
Seit 1999 wurde eine Anzahl von Brücken mit der VOPA-Bauweise instand gesetzt, so dass gesicherte Erfahrungen zu den erforderlichen Randbedingungen bei der Herstellung und zur Dauerhaftigkeit vorliegen.

Im Jahre 2010 wurde ein Forschungsvorhaben zur Thematik "Hohlraumreiches Asphaltträgergerüst mit nachträglichem Verguss als schnelles Abdichtungssystem auf Brücken (HANV)" durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung abgeschlossen [5]. Wesentliches Ziel dieses Vorhabens war die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Systems bei der Überbrückung von Rissen und der Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen auf den Schichtenverbund. Das Vorhaben schließt mit der Erkenntnis, dass bei der Prüfung mit dem damals verwendeten Verfüllbaustoff eine Rissüberbrückung bis zu einer dynamischen Rissbewegung von 0,1 mm bei -20 °C möglich ist.

In den "Hinweisen für die Herstellung von Abdichtungssystemen aus Hohlraumreichen Asphaltträgergerüsten mit Nachträglicher Verfüllung für Ingenieurbauten aus Beton (H HANV)" [6] wurden alle Erkenntnisse aus abgeschlossenen Baumaßnahmen zusammengetragen und ein erster Schritt in Richtung einer Regelbauweise gemacht. Dabei werden nicht nur erste Empfehlungen für die Eigenschaften und Zusammensetzung der HANV-Schicht selbst aufgeführt, sondern auch für die Verfüllbaustoffe und das hohlraumreiche Asphaltträgergerüst.

## 2 Problemstellung

Die im Straßenbau verwendeten Ausgangsstoffe unterliegen hohen Standards, welche in den europäischen Normen bzw. den nationalen Umsetzungen z.B. in der TL Bitumen-StB oder der TL Gestein-StB festgehalten sind. Die Anforderungen an das Gestein, die das Trägergerüst beeinflussen, sind mit den halbstarren Deckschichten bereits hinreichend optimiert worden [21]. Ebenso wurden die Bindemittel größtenteils aus der Bauweise übernommen. Für Reaktionsharze gibt es kein Regelwerk auf diesem Rechtsniveau, welches die Eigenschaften genau spezifiziert. Dabei steht bei der HANV-Bauweise, ausgehend von der volumetrischen Betrachtung (vgl. Bild 1), dem konventionell verwendeten bitumenhaltigen Bindemittel bzw. Bitumen nur eine sekundäre Aufgabe zu. Primär sollte die Schicht von den Eigenschaften des Verfüllbaustoffes geprägt sein, eine Vermutung, die bisher nur auf Erfahrungen und nicht auf quantitativen Nachweisen beruht.



**Bild 1:** Betrachtung der Volumenanteile einer HANV-Schicht (ohne Berücksichtigung der stabilisierenden Zusätze) und dem Verhältnis Verfüllbaustoff / Bitumen nach der empfohlenen Zusammensetzung der H HANV [5].

### 3 Konzept der Untersuchungen

Das Forschungsziel bestand in der Optimierung des bestehenden Abdichtungssystems auf Beton durch die Spezifizierung der Verarbeitungs-, Aushärtungs- und Gebrauchseigenschaften der Reaktionsharze für eine möglichst kurze Ausführungszeit. Andererseits sollten auch die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten für die Abdichtung von Stahlbrücken sondiert werden, bei denen eine elastische Abdichtungsschicht mit definierten Kennwerten u.U. einen statischen Beitrag bei der Lastabtragung liefern könnte.

Zur Erreichung des Forschungsziels wurden die Untersuchungen in 2 Phasen geteilt.

- Phase 1:  
Optimierung der vorhandenen Baustoffe- und Baustoffgemische über:
  - Optimierung des Asphalttraggerüsts
  - Charakterisierung der Verfüllbaustoffe
  - Untersuchung der Gebrauchseigenschaften an der HANV-Schicht
- Phase 2:  
Prüfung der Rissüberbrückung

## 4 Optimierung der Baustoffe- und Baustoffgemische

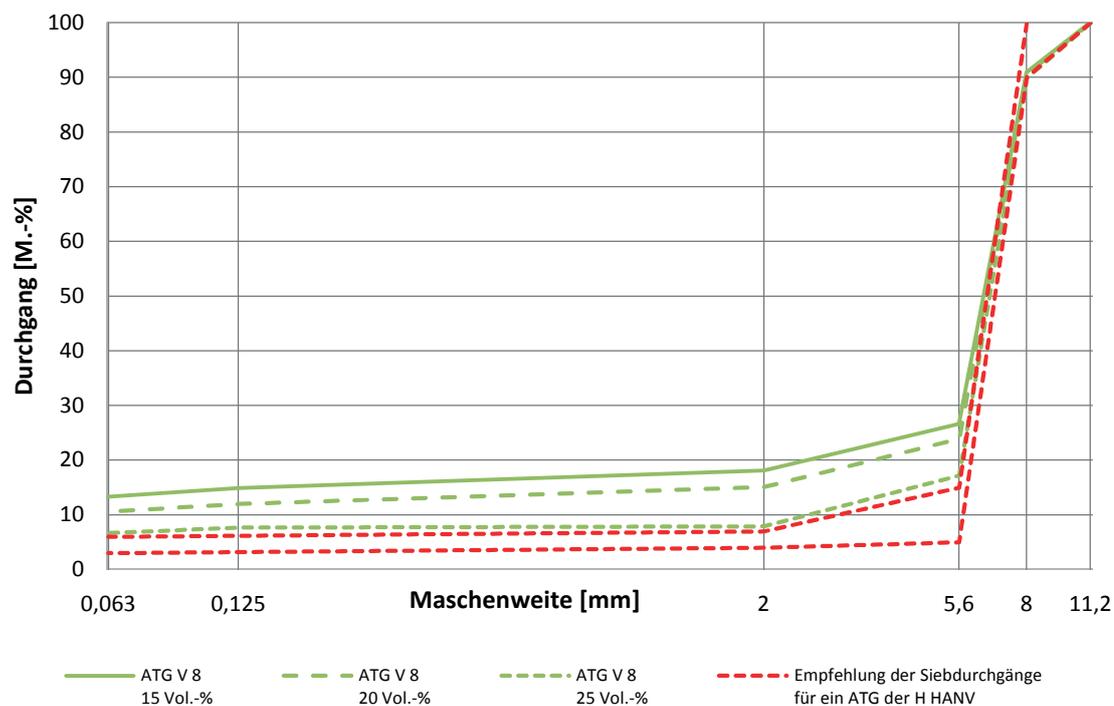
### 4.1 Asphalttraggerüst

#### 4.1.1 Zusammensetzung und volumetrische Kennwerte

Um den Einfluss der Attribute und des Volumenanteils des Reaktionsharzes auf die Eigenschaften der verfüllten Schicht beurteilen zu können, wurde der Hohlraumgehalt in drei Kategorien gestuft. Als niedrigster Hohlraumgehalt wurde ein Korngerüst mit 15 Vol.-% konzipiert, welches unter dem Niveau der H HANV liegt. Als mittleres Niveau

wurde ein Hohlraumgehalt von 20 Vol.-% und als Obergrenze wurden 25 Vol.-% festgelegt.

Als Asphalttraggerüst wurde einheitlich ein Asphaltmischgut mit 8 mm Größtkorn verwendet. Um den Hohlraumgehalt besser steuern zu können, wurde nach Vorversuchen ein höherer Fülleranteil verwendet als in den H HANV empfohlen. Nachfolgend sind die resultierenden Sieblinien des Asphaltmischgutes dargestellt. Die Erstprüfungen sind dem Anhang 1 beigelegt.

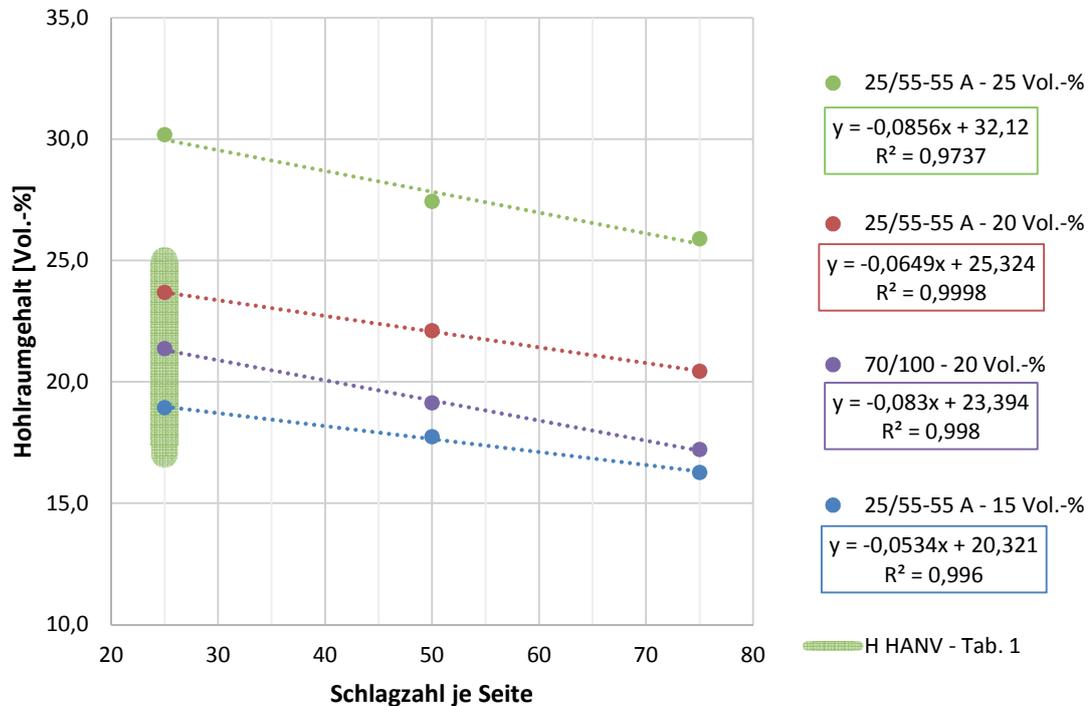


**Bild 2:** Korngrößenverteilungen der drei Grundmischgutsorten für ein ATG

Als Standardbitumen wurde für das ATG mit einem Hohlraumgehalt von 20 Vol.-% ein Straßenbaubitumen 70/100 entsprechend der H HANV verwendet. Um den Einfluss der Bindemittelart und -sorte zu quantifizieren, wurden alternativ Mischungen mit einem Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A mit allen Kornzusammensetzungen hergestellt. Der Gesamtbindemittelgehalt wurde mit 6,5 M.-% konstant gehalten. Weiterhin wurde als stabilisierender Zusatz gegen den Bindemittelablauf 0,5 M.-% Cellulosefasern hinzugegeben. Die Mischgutvarianten wurden großtechnisch von einem Asphaltmischwerk der Deutschen Asphalt in Hamburg produziert, um den Einfluss aus der Laborherstellung ausschließen zu können und eine hohe Homogenität der Mischungen zu erreichen.

An allen Mischgutvarianten wurde in einem ersten Schritt das Verhalten bei unterschiedlicher Verdichtungsarbeit nach dem Verfahren der TP Asphalt-StB Teil 30 [17] untersucht. Anhand der Veränderung des Hohlraumgehaltes bei zunehmender Verdichtungsenergie (Schlagzahlen) kann eine Aussage zur Empfindlichkeit des Asphaltmischgutes gegenüber Überverdichtung und Kornzertrümmerung getroffen werden. Bei der Herstellung eines ATG dient das Walzenregime nur dazu, die Oberfläche der Schicht zu glätten und die Gesteinskörner in eine dichte Lagerung zu bringen. Hierzu genügt ein leichtes Andrücken mit statischen Walzen, keinesfalls eine dynamische Verdichtung. Eine Aussage zum Erreichen des angestrebten Hohlraumsystems ist besonders wichtig, da aufgrund der geringen Schichtdicke und des hohen Hohlraumgehaltes eine baubegleitende zerstörungsfreie Dichtemessung, z.B. mit einer radiometrischen Sonde, ebenso wie eine zerstörende Prüfung an Bohrkernen aus Zeitgründen nicht möglich ist. Die Zusammensetzung des

Gesteinskörnungsgerüstes muss gewährleisten, dass die funktionalen Eigenschaften der Schicht erhalten bleiben, auch wenn aus räumlichen Zwängen die Schicht durch die Walze mehrfach überfahren wird oder der Asphaltfertiger über das frisch eingebaute ATG umgesetzt werden muss. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Die Ergebnisse der jeweils 3 Einzelversuche sind dem Anhang 2 beigefügt.

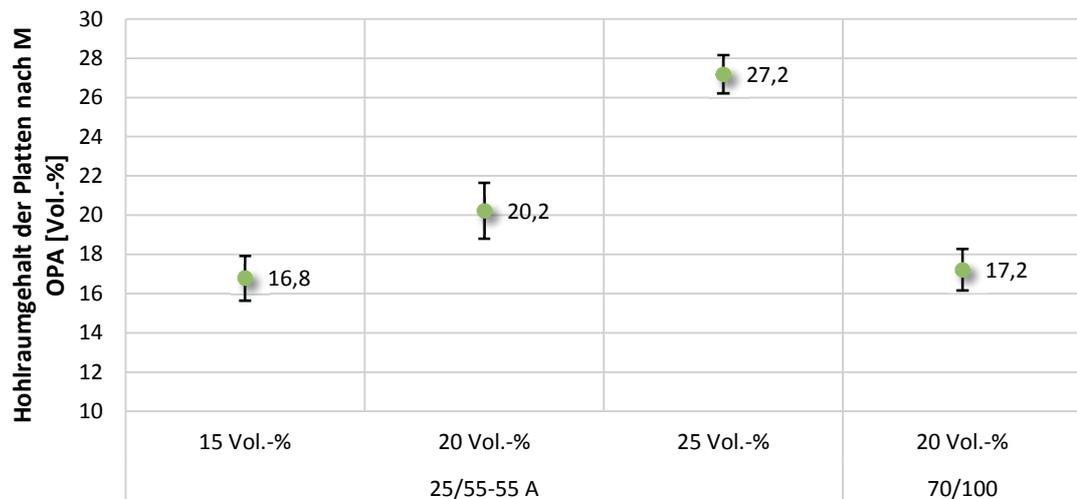


**Bild 3:** Veränderung des Hohlraumgehaltes bei unterschiedlichen Schlagzahlen

In den H HANV wird eine Verdichtung mit 25 Schlägen je Probekörperseite und ein Hohlraumgehalt von 17 Vol.-% bis 25 Vol.-% empfohlen. Dies wird von den Mischgutvarianten mit Bitumen 25/55-55 A bei einem Zielhohlraumgehalt von 15 Vol.-% und 20 Vol.-%, sowie der Mischgutvariante mit einem Bitumen 70/100 erfüllt.

An den Mischgutvarianten mit einem 25/55-55 A ist erkennbar, dass mit abnehmendem Füllergehalt bzw. zunehmendem Hohlraumgehalt das Asphaltmischgut empfindlicher auf eine Veränderung der Verdichtungsenergie reagiert. Ein polymermodifiziertes Bindemittel erhöht den Widerstand gegen die Kornumlagerung im Vergleich zu einem Straßenbaubitumen. Mit zunehmenden Schlagzahlen nimmt der Hohlraumgehalt der Mischgutvariante mit Straßenbaubitumen im Vergleich zum polymermodifizierten Bitumen stärker ab. Bei vergleichbarer Kornzusammensetzung kann mit dem polymermodifizierten Bitumen ein höherer Hohlraumgehalt prozesssicherer erzielt werden. Dies kann als Indiz für eine verbesserte Tragfähigkeit interpretiert werden.

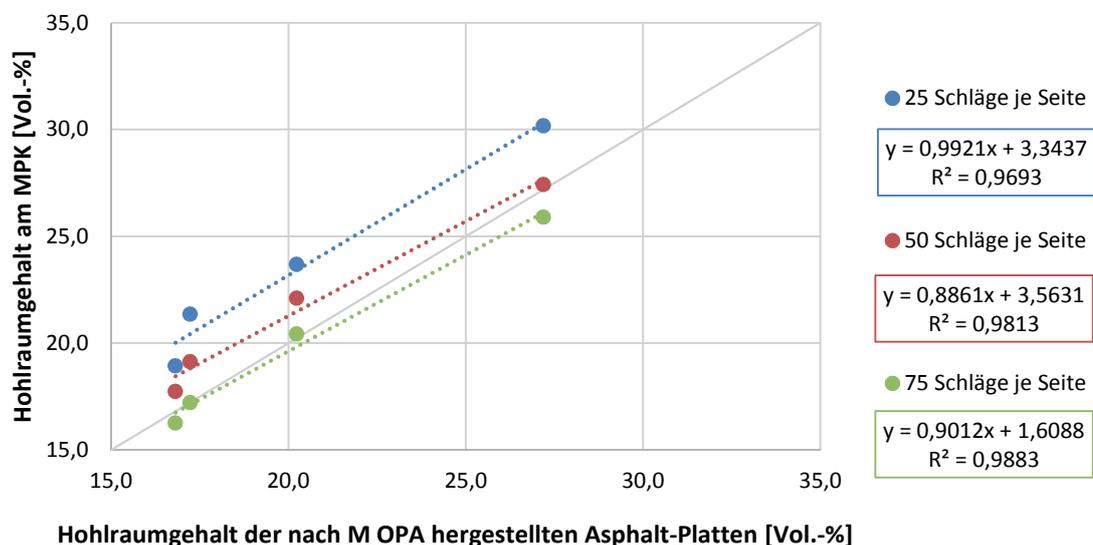
Neben den Marshall-Probekörpern wurde eine Vielzahl von Probepplatten für die nachfolgenden Untersuchungen mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät entsprechend der TP Asphalt-StB Teil 33 [18] hergestellt. Als Verdichtungsregime wurde eine weggeregelte Vorbelastung und eine kraftgeregelte Hauptverdichtung entsprechend dem M OPA [20] gewählt. An allen Asphalt-Probepplatten wurde, wie bei den Marshall-Probekörpern, die Raumdichte nach dem Ausmessverfahren (Verfahren D der TP Asphalt-StB Teil 6 [13]) bestimmt. Nachfolgend sind die daraus berechneten Hohlraumgehalte dargestellt.



**Bild 4:** Spannweiten der Hohlraumgehalt der hergestellten Asphalt-Probplatten

Die Hohlraumgehalte unterscheiden sich von denen der Marshall-Probekörper gleicher Zusammensetzung. Insgesamt weisen die Prüfergebnisse an den Platten eine enge Spannweite auf, was für dieses Verfahren der Probekörperherstellung spricht. Die anvisierten Hohlraumgehalte wurden sehr präzise getroffen, wobei der Zielhohlraumgehalt beim Bindemittel 25/55-55 A von 25 Vol.-% um im Mittel 2,2 Vol.-% überschritten und bei der Bindemittelsorte 70/100 bei 20 Vol.-% um im Mittel 2,8 Vol.-% unterschritten wurde. Die gleiche Tendenz war ebenfalls an den Marshall-Probekörpern erkennbar (vgl. Bild 3).

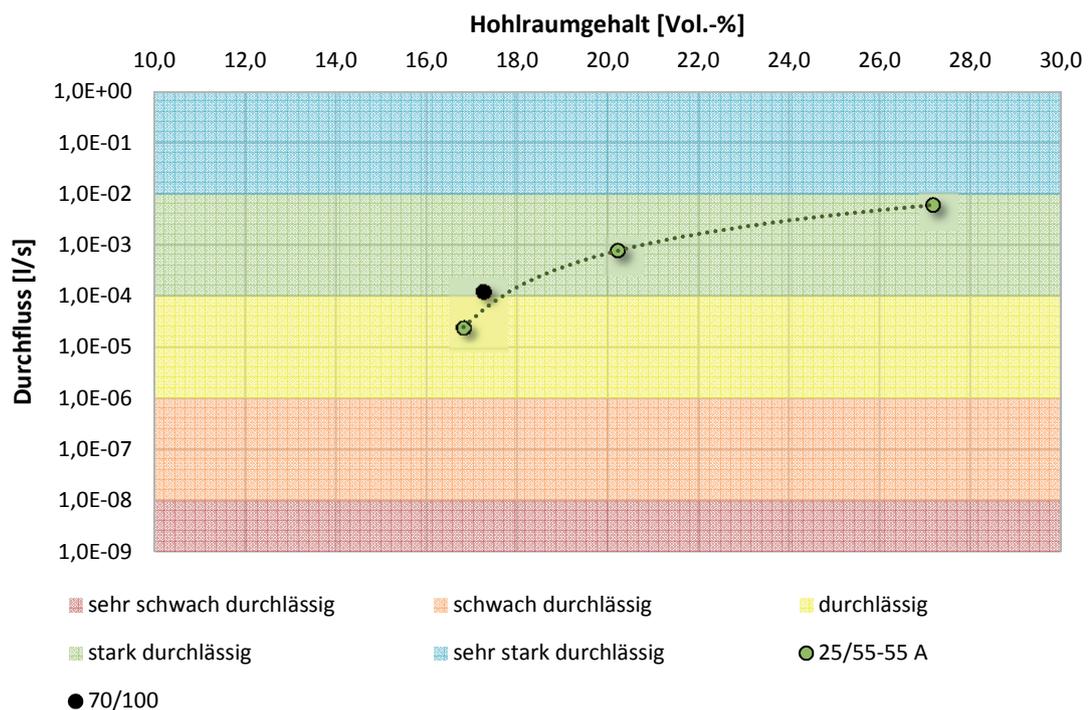
Bei Gegenüberstellung der Hohlraumgehalte der Asphalt-Platten und der Marshall-Probekörper (vgl. Bild 5) führt die nach H HANV empfohlene Schlagzahl von 25 Schlägen je Probekörperseite zu einem um ca. 3,3 Vol.-% höheren Niveau im Vergleich zu den Asphalt-Platten. Bei einem Hohlraumgehalt von ca. 17 Vol.-%, welcher der unteren Empfehlungsgrenze nach H HANV entspricht, wäre eine Verdichtungsenergie von 75 Schlägen je Seite notwendig, um einen den Asphalt-Platten äquivalenten Hohlraumgehalt zu erreichen. Mit zunehmendem Hohlraumgehalt nimmt die benötigte Verdichtungsenergie auf 2 x 50 Schläge je Seite ab, um ein äquivalentes Niveau zu erreichen.



**Bild 5:** Gegenüberstellung der Hohlraumgehalte der Asphalt-Platten und der MPKs

#### 4.1.2 Prüfung der Verfüllbarkeit über die Durchlässigkeit

Um die Eignung der Asphalttraggerüste für den Verfüllvorgang zu beurteilen, sollte die Kommunikation zwischen den Hohlräumen untersucht werden. Hierzu wurden vier Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm aus den Asphaltprobeplatten gezogen und in Anlehnung an die DIN 18507 [7] untersucht. Dabei wurde die Wassermenge aufgefangen, die in einer Durchflusszeit von 300 s den Prüfkörper durchströmt. Bei Reaktionsharzen liegt ein vergleichbar niedriges Niveau der Viskosität bei hohen Temperaturen vor, wie bei demineralisiertem Wasser. Während der Prüfung wurde der Wasserstand über der Probe im gesamten Zeitraum auf 1 cm konstant gehalten.



**Bild 6:** Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen vor dem Bewertungshintergrund der DIN EN 18300-1

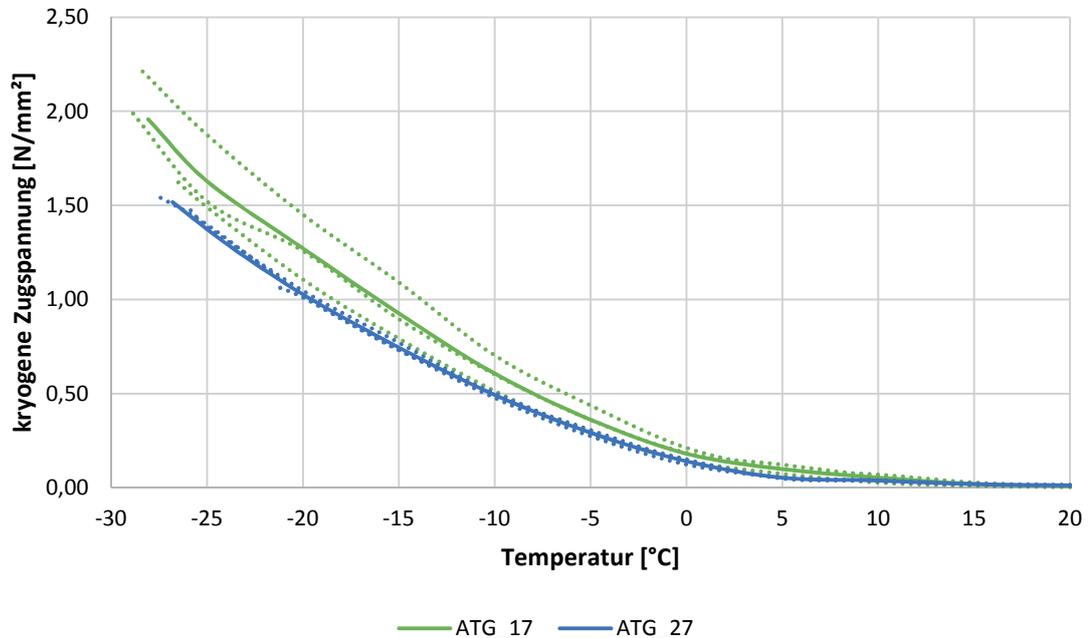
Zur Orientierung wurden in Bild 6 die an den Probekörpern ermittelten Durchlässigkeiten vor dem Bewertungshintergrund der DIN EN 18300-1 dargestellt. Gegenüber den Hohlraumgehalten an den Asphaltplatten sind vergleichbare Tendenzen erkennbar. Mit steigendem Hohlraumgehalt steigt die Anzahl an kommunizierenden Verbindungen im Asphalt und folglich die Durchlässigkeit. Die Mischgutvariante mit einem Straßenbaubitumen 70/100 reiht sich in den Verlauf der Varianten mit einem 25/55-55 A ein.

Es erscheint, dass sich die Durchlässigkeit mit zunehmendem Hohlraumgehalt asymptotisch einem Niveau von 0,01 l/s annähert. Im Abschnitt 5 wird anhand des Hohlraumgehaltes eine Gegenüberstellung zwischen der Verfüllbarkeit des Asphalttraggerüstes, der anfänglichen Viskosität der Reaktionsharze und indirekt der Durchlässigkeit vorgenommen.

#### 4.1.3 Verhalten bei tiefen Temperaturen

Das Tieftemperaturverhalten der unverfüllten Asphalttraggerüste wurde mit dem Abkühlversuch entsprechend der TP Asphalt-StB Teil 46a [19] an Prismen (50 mm x 50 mm x 160 mm) untersucht. Der größere Querschnitt wurde gewählt, um die effektive Prüffläche gegenüber hohlraumarmen Asphaltvarianten zu vergrößern und damit die Präzision des Verfahrens zu verbessern. Veranlassung dazu gaben

eigene Erfahrungen bei der Prüfung von offenporigen Asphaltdeckschichten. In einem ersten Tastversuch wurden die Untersuchungen an den Varianten mit 17 Vol.-% und 27 Vol.-% Hohlraumgehalt und einem Bitumen 25/55-55 A durchgeführt, um festzustellen, ob signifikante Abhängigkeiten zwischen Bruchtemperatur und Hohlraumgehalt im relevanten Niveau erkennbar sind.



**Bild 7:** Entwicklung der kryogenen Zugspannung bei Durchführung des Abkühlversuches nach TP Asphalt-StB Teil 46a (Volllinien: Mittelwerte; Strichlinien: Einzelwerte)

Als Ergebnis ist festzustellen, dass zwischen den beiden Varianten keine signifikanten Unterschiede erkennbar sind. Es kann die Aussage getroffen werden, dass die Bruchtemperatur des Asphalttraggerüstes, im untersuchten Hohlraumgehaltsniveau, unabhängig vom Hohlraumgehalt ist. Das Asphalttraggerüst ohne Verfüllung weist eine Bruchtemperatur von im Mittel -27,4 °C bei einer geringen Bruchspannung von 1,7 MPa auf. Mit zunehmendem Hohlraumgehalt erscheint die Zunahme der kryogenen Zugspannungen gedämpfter und tendenziell geringer zu werden.

Es wird davon ausgegangen, dass für das Tieftemperaturverhalten eines Asphalttraggerüstes der Einfluss der Bitumensorte vernachlässigbar ist.

#### 4.1.4 Resümee

Anhand der vorliegenden Ergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

- Eine Verdichtungsenergie am MPK von 25 Schlägen je Seite führt hinsichtlich des Hohlraumgehaltes zu anderen Ergebnissen als eine Asphalt-Platte aus gleichem Asphaltmischgut, die nach dem M OPA hergestellt wurde.
- Durch den Füllergehalt konnte der Hohlraumgehalt zielsicher angesteuert werden.
- Ein Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 A gibt dem ATG mehr Widerstand gegen Kornumlagerung im frischen Zustand und höhere Prozesssicherheit bezüglich der Ansteuerung des Zielhohlraumgehaltes.
- Das Tieftemperaturverhalten des ATG erscheint im untersuchten Hohlraumgehaltsniveau unabhängig vom Hohlraumgehalt.

Für die weiteren Versuche wurde nur noch das ATG mit einem polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A verwendet.

## **4.2 Verfüllbaustoffe**

### **4.2.1 Grundcharakterisierung nach H HANV**

Für die Untersuchungen wurden drei in Ihren Eigenschaften unterschiedliche Verfüllbaustoffe gewählt. Von zwei der Verfüllbaustoffe sind die Eigenschaften aus vorangegangenen Untersuchungen bekannt (Verfüllbaustoff A und B). Der dritte Verfüllbaustoff ist eine Weiterentwicklung von Verfüllbaustoff B auf Basis erster Erkenntnisse (Verfüllbaustoff C).

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchungen nach H HANV Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse nach Tabelle 3 der H HANV

Nr.	Prüfung	Prüfung nach den TP-BEL-EP Abschnitt Nr. oder Norm	Verfüllbaustoff			Empfehlung nach H HANV	
			A aus [23]	B aus [24]	C		
<b>Prüfung an den Ausgangsstoffen</b>							
1	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	3.1.1	Komp. A	1,112	1,061	1,105	Wert ermitteln
			Komp. B	1,032	0,979	0,985	
2	Viskosität bei 23 °C bei 250 s <sup>-1</sup> [mPa]	3.1.2	Komp. A	1,050	515	890	Wert ermitteln
			Komp. B	435	32,7	34	
<b>Prüfung an den angemischten bzw. erhärteten Stoffen</b>							
5	Viskosität bei +12 °C [mPa]	3.2.1	3.240	635	756	≤ 5000 mPa • s	
6	Glührückstand [M.-%]	3.2.2	0,54	0,01	0,02	< 1 M.-%	
7	Topfzeit [min.]	3.2.3	26	28	18 (29 °)	≥ 10 min.	
8	Festigkeitsentwicklung	Shore A oder D nach DIN EN ISO 868	nach 1 Tag	97,2	5,8	40	Werte ermitteln Messung der Festigkeitsentwicklung bei 23 °C nach jeweils 1/2/5 und 7 Tagen
			nach 2 Tagen	98,3	15,8	41	
			nach 5 Tagen	96,6	16,2	41	
			nach 7 Tagen	97,9	15,4	35	
9	Feuchteempfindlichkeit	3.2.5	Kein Weißanlaufen	Kein Weißanlaufen	Kein Weißanlaufen	Kein Weißanlaufen	
10	Nichtflüchtige Anteile [M.-%]	3.2.6	99,5	98,4	94,6	≥ 95 M.-%	
11	Extrahierbare Anteile [M.-%]	3.2.7	12,3	73	46	≤ 15 M.-%	
12	Wasseraufnahme [M.-%]	3.2.8	7d/23 °C	3,6	4,8	35	≤ 4 M.-%
			7d/23 °C+7d/70 °C	3,5	8,7	nicht bestimmt	
13	Biegemodul [GPa]	DIN EN ISO 178	1,2	0,4*	0,010	≤ 2,0 GPa	
14	Biegedehnung [%]	DIN EN ISO 178	5,2	5,7*	7,2	≥ 4 %	

° Ergebnis nach Angaben des Herstellers.

\* Prüfung abweichend bei 10 °C durchgeführt. Bei 23 °C verformte sich der Balken eigenständig durch das Eigengewicht.

Mit dem Verfüllbaustoff A konnten in der Praxis über viele Jahre bereits Erfahrungen gesammelt werden. Der erhärtete Zustand ist objektiv nahezu elastisch und weist kein signifikant viskoses Verhalten auf.

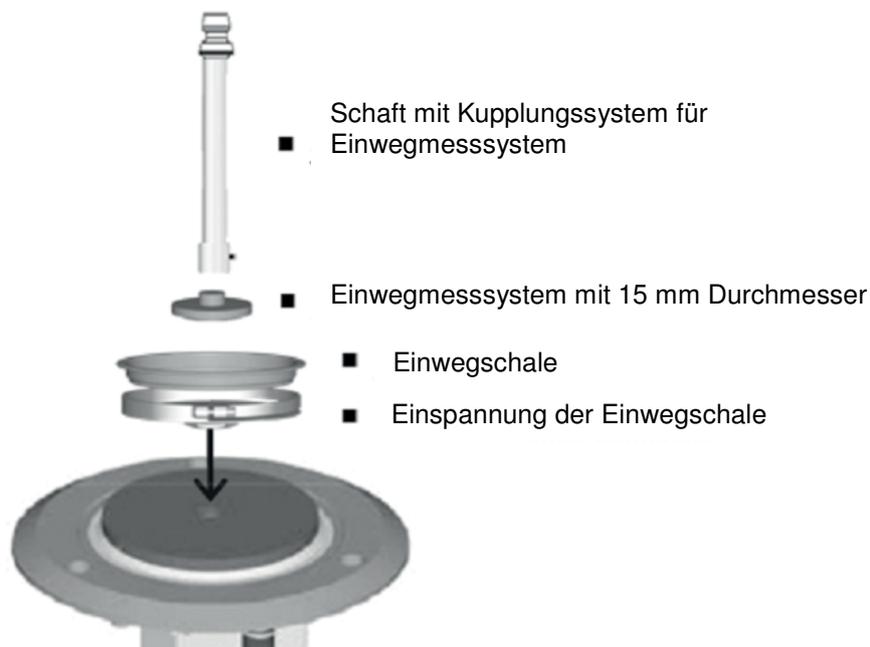
Mit der Konzeption des Verfüllbaustoffes B sollte ein Material entwickelt werden, welches durch seine geringere Anfangsviskosität noch schneller in das Asphalttraggerüst penetriert und durch seine viskosen bzw. flexiblen Eigenschaften die Verformungen infolge von Schwingungen im Bauwerk besser aufnimmt. Die viskosen Eigenschaften sind vor allem bei der Prüfung der Biegeeigenschaften erkennbar. Bei konventionellen Prüfbedingungen (22 °C) biegt sich der Balken ohne Krafteinwirkung durch das Eigengewicht durch. Erst bei Reduzierung der Temperatur auf 10 °C konnte eine Messung durchgeführt werden. Ebenso zeigt die Shore Härte ein deutlich geringeres Niveau im Vergleich zum Verfüllbaustoff A. Als ungünstige Eigenschaft konnte bei Laborprüfungen festgestellt werden, dass die Erhärtung unter gewissen Randbedingungen über 24 Stunden andauern kann. Dieser lange Zeitraum ist aus der Topfzeit nicht ableitbar.

Dies bewog den Hersteller dazu eine Optimierung vorzunehmen, welche als Verfüllbaustoff C in das Forschungsprojekt aufgenommen wurde. Die Anfangsviskosität ist etwas höher, aber dennoch deutlich geringer als beim Verfüllbaustoff A. Ebenso nimmt die Shore Härte im Vergleich zum Verfüllbaustoff B zu.

#### 4.2.2 Reaktionskinetik in Abhängigkeit von der Temperatur

Neben den Optimierungen an den Reaktionsharzen war eine Weiterentwicklung bzw. Ergänzung der vorhandenen Prüfverfahren (vgl. Tab. 3 der H HANV) ein Ziel dieses Projektes. Durch Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen sollte die Reaktionskinetik und deren Empfindlichkeit gegenüber thermischen Veränderungen beschrieben werden.

Durch Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) konnte der Temperatureinfluss auf das rheologische Verhalten simuliert und quantitativ ermittelt werden. Hierzu wurden die Steifigkeiten und das viskoelastische Verhalten der Reaktionsharze während der Aushärtung im frisch angemischtem Zustand mit einem angepassten System gemessen (siehe Bild 8). Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilung am Rand des Messsystems sind die Ergebnisse nur bedingt über die Relation mit dem gemessenen viskoelastischen Verhalten am Festkörper vergleichbar.



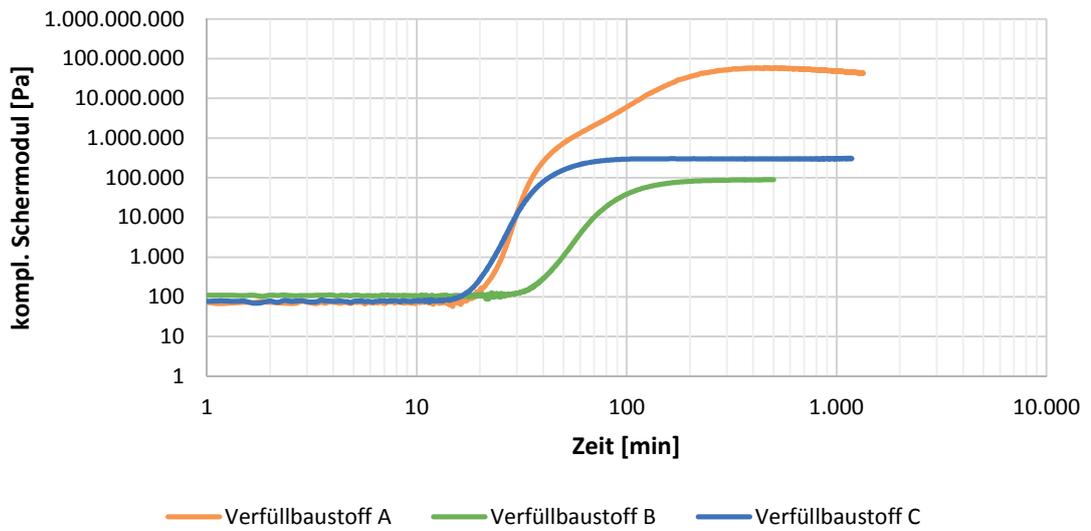
**Bild 8:** Messsystem zur Ermittlung des Verarbeitungs- und Aushärtungsverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen

Zur Beurteilung der Vernetzungsreaktion wurden Versuche bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 5 °C, 23 °C und 60 °C durchgeführt. Diese drei Temperaturschritte sollten eine niedrigste, eine mittlere und höchste Temperatur des ATG oder der Umgebung während des Flutens bzw. der Erhärtung nachempfinden. Die Temperatur wurde über die gesamte Prüfdauer konstant gehalten, um die isotherme Reaktionskinetik zu messen. Dabei wurden die in Tabelle 2 dargestellten Vorgaben zur Messung getroffen.

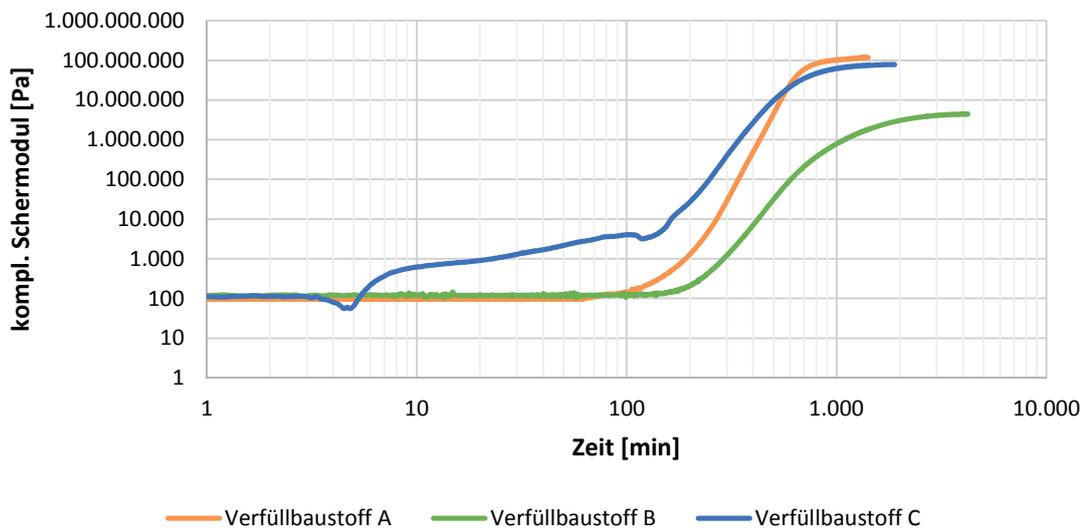
**Tabelle 2:** Messbedingungen der isothermen Reaktionskinetik

Zeit	von 0 bis 60 Minuten	von 1 Stunde bis 24 Stunden	vom 1. Tag bis zum 5. Tag
Messpunkt alle	10 Sekunden	60 Sekunden	5 Minuten
Beanspruchung	oszillierend		
Verformung	0,05 % (entspricht einer Auslenkung von ca. 0,00378 Grad)		
Frequenz	10 rad/s		
Temperatur	konstant bei 5 °C, 23 °C oder 60 °C		
Spalthöhe	1 mm		
Volumen des Verfüllbaustoffes	3 ml		

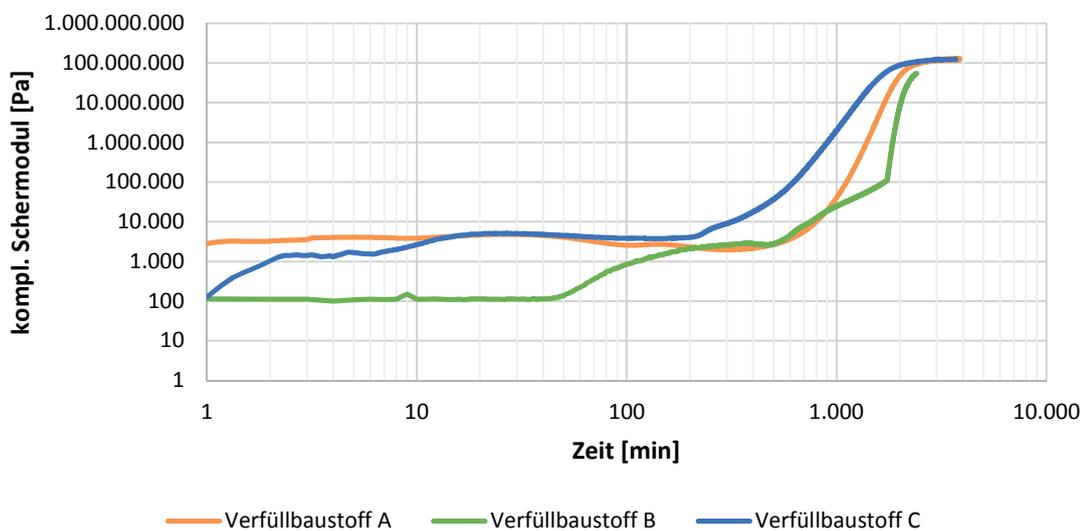
Bei Ausbildung eines asymptotischen Steifigkeitsverlaufes wurden die Untersuchungen abgebrochen. Jede Kurve ist das Ergebnis einer Doppelbestimmung. Die sehr geringe Verformung führt zu keinen strukturellen Störungen in der Probe und wurde durch Vorversuche festgelegt. Der direkt mit der Probe in Kontakt tretenden Luft wird vorab die Feuchtigkeit entzogen. Somit nähert sich die Feuchtigkeit bei der Prüfung nahezu 0 % rel. Luftfeuchte an. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Prüfung dargestellt. Sie werden im Anschluss erörtert.



**Bild 9:** Isotherme Reaktionskinetik der drei Verfüllbaustoffe bei einer Temperatur von 60 °C



**Bild 10:** Isotherme Reaktionskinetik der drei Verfüllbaustoffe bei einer Temperatur von 23 °C



**Bild 11:** Isotherme Reaktionskinetik der drei Verfüllbaustoffe bei einer Temperatur von 5 °C

Bei vergleichbaren Untersuchungen an Reaktionsharzen wird zumeist das Speicher- und Verlustmodul als Indiz für einen Gelübergang (Phasenwinkel = 45°) herangezogen. Bei den vorliegenden Verfüllbaustoffen und Messbedingungen konnte diese Methodik nicht genutzt werden, da eine deutliche Abhängigkeit der Eigenschaften der Reaktionsharze von der Umgebungstemperatur erkennbar ist. Mit abnehmender Temperatur steigt das elastische Verhalten und verzerrt die Ergebnisse.

Bei einer Aushärtung in einer Umgebungstemperatur von 60 °C können zusammengefasst folgende Unterschiede zwischen den Verfüllbaustoffen festgehalten werden:

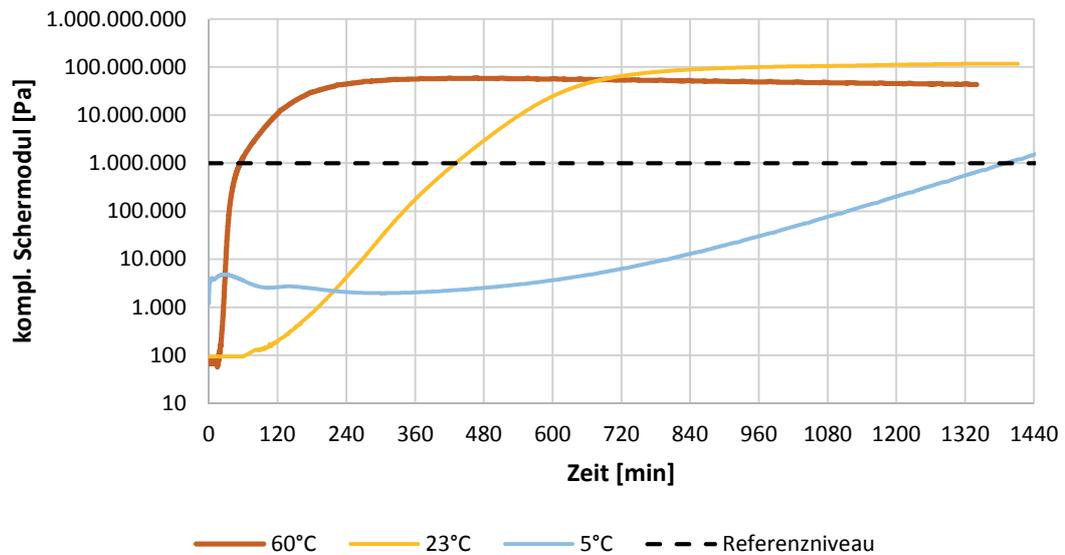
- Der Verfüllbaustoff A weist die höchste und der Verfüllbaustoff C die niedrigste Endfestigkeit<sup>1</sup> auf. Die Ergebnisse der Endfestigkeit korrelieren sehr gut mit dem Niveau der Shore Härten.
- Der Verfüllbaustoff C erreicht am schnellsten seine Endfestigkeit und der Verfüllbaustoff A benötigt die längste Zeit. Der Verfüllbaustoff A ist gekennzeichnet durch ein höheres Niveau der Steifigkeit, welches frühzeitig erreicht wird aber bis zur vollständigen Ausprägung der Endfestigkeit eine vergleichsweise längere Zeit benötigt.

Bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C nähert sich das Niveau der Endfestigkeit und die Reaktionsgeschwindigkeit der Verfüllbaustoffe A und C an, wobei die anfängliche Vernetzungsreaktion beim Verfüllbaustoff C schneller verläuft. Bei einer Temperatur von 5 °C ist die Endfestigkeit der Verfüllbaustoffe A und C vergleichbar. Der Verfüllbaustoff C weist eine schnellere Vernetzungsreaktion auf.

Mit abnehmender Temperatur nimmt die Reaktionszeit exponentiell zu. Am Beispiel des Verfüllbaustoffes A ist sehr gut zu erkennen, dass ein Steifigkeitsniveau von 1 MPa (schwarze Strichlinie in Bild 12) bei 60 °C nach ca. 1 Stunde erreicht wird. Bei 23 °C werden in etwa 7 Stunden benötigt und bei 5 °C fast ein Tag. Anhand dieser einfachen Vergleiche über Äquisteifigkeitstemperaturen ist eine Beurteilung der Empfindlichkeit gegenüber Einflüssen aus der Umgebungstemperatur bei der Reaktion bzw. Vernetzung möglich.

---

<sup>1</sup> Als Endfestigkeit wird ein Niveau des komplexen Schermoduls definiert, welches sich um maximal 5 % bei einer weitergehenden Aushärtungszeit verändert.

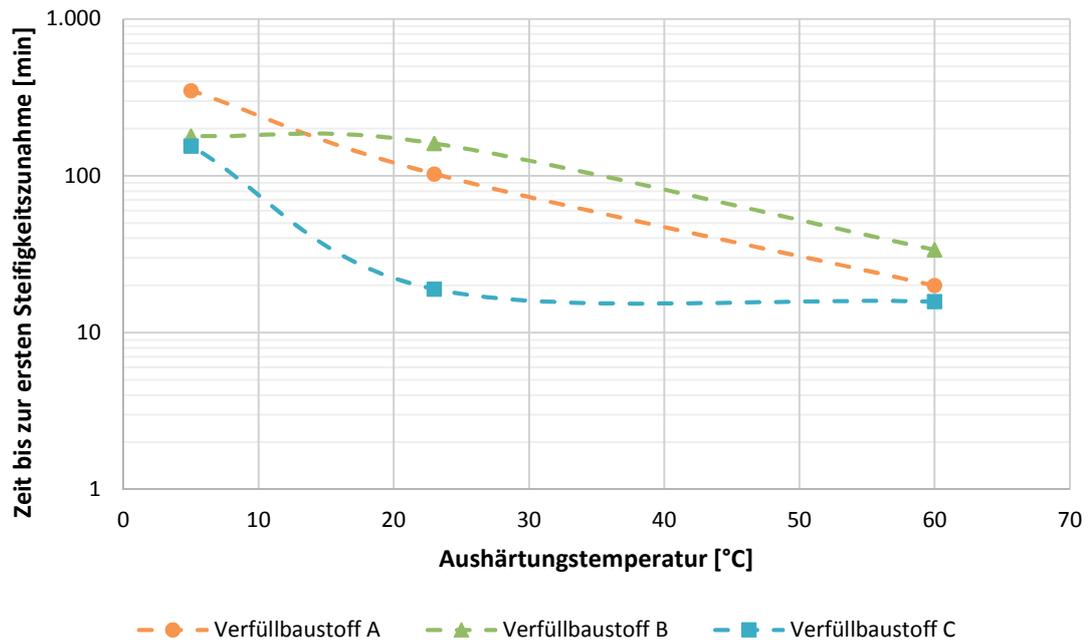


**Bild 12:** Exemplarische Veränderung der Reaktionskinetik des Verfüllbaustoffes A bei unterschiedlichen Temperaturen

Nachfolgend werden gezielt verschiedene Niveaus der Äquisteifigkeitstemperaturen miteinander verglichen, um bestimmte Gebrauchseigenschaften näher zu charakterisieren.

Verarbeitbarkeit:

Wie in Bild 9, Bild 10 und Bild 11 erkennbar ist, bildet die Steifigkeit zu Beginn der Reaktion ein Plateau aus, welches für eine einheitliche Steifigkeit der Verfüllbaustoffe steht. Erst wenn die Vernetzungsreaktion startet nimmt die Steifigkeit zu. Erfahrungsgemäß ist eine Steifigkeit von im Mittel 100 Pa, was in etwa dem doppelten Wert von demineralisiertem Wasser entspricht, als ausreichend für die Penetration in das Asphaltträgerüst anzusehen. Bei einer Reaktion im Bereich tiefer Verarbeitungstemperaturen kann es aufgrund der thermischen Abhängigkeit der Viskosität zu einer Erhöhung des anfänglichen Plateaus kommen, was sich negativ auf die Penetrierfähigkeit auswirkt. Für die nachfolgende Betrachtung wird dieser Aspekt nicht berücksichtigt. Bei einer Prüftemperatur von 5 °C wird dementsprechend der Beginn der Vernetzungsreaktion über den Anstieg des Steifigkeitsmoduls beschrieben.

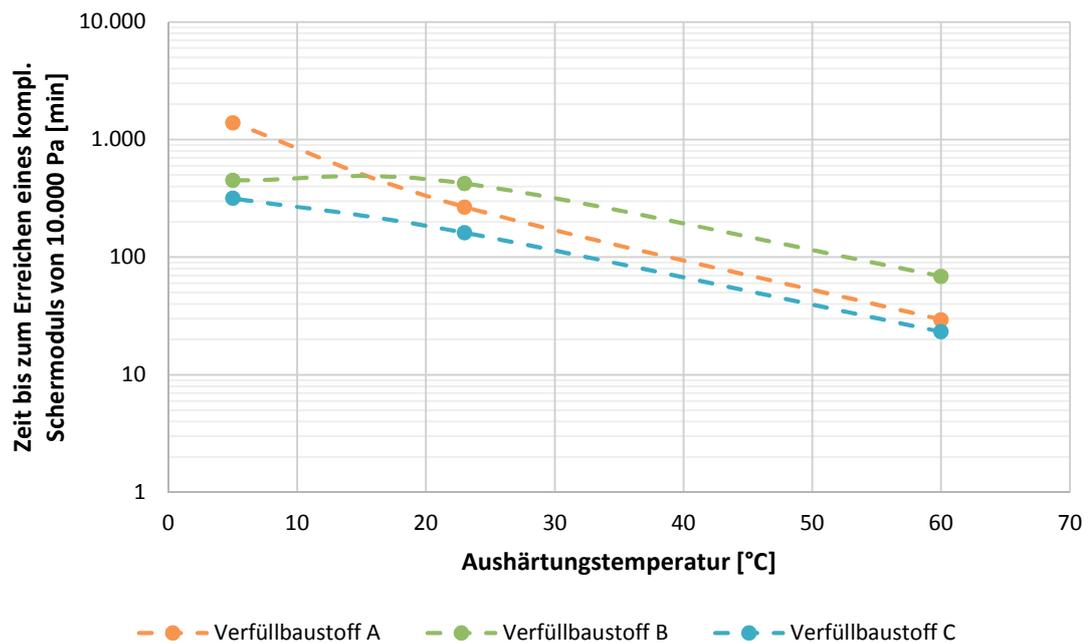


**Bild 13:** Beginn der Reaktionskinetik in Abhängigkeit von der Aushärtungstemperatur der Verfüllbaustoffe

Der Verfüllbaustoff A weist mit zunehmender Temperatur einen exponentiell fallenden Trend auf. Mit zunehmender Aushärtungstemperatur nimmt die Dauer bis zum Beginn erster Vernetzungsreaktionen auf bis zu 20 Minuten bei einer Prüftemperatur von 60 °C deutlich ab. Tendenziell länger benötigt der Verfüllbaustoff B, der bei abnehmender Aushärtungstemperatur vergleichbare Anfangszeiten aufweist. Dem gegenüber steht die optimierte Variante (Verfüllbaustoff C), welche erst bei 5 °C eine vergleichbare Verarbeitungszeit erwarten lässt. Bei 60 °C werden ca. 16 Minuten bis zum Beginn der ersten Reaktionskinetik benötigt. Mit zunehmender Temperatur egalisiert sich die Abhängigkeit zwischen der Aushärtungstemperatur und der Zeit bis zur äquivalenten Steifigkeit.

#### Überarbeitbarkeit:

Bisherige Erkenntnisse mit dem Verfüllbaustoff A zeigen in der Praxis eine sehr gute Haftzugfestigkeit zwischen der HANV-Schicht und der Asphaltzwischen-schicht aus Walzasphalt, wenn bei Überarbeitung eine honigartige Konsistenz vorliegt. In der Praxis war dies bisher über die Ausbildung von Fäden ersichtlich, wenn das Reaktionsharz berührt wird. Bei Messung von Honig mit dem benutzten Messsystem entspricht dies einem komplexen Schermodul von ca. 10.000 Pa.



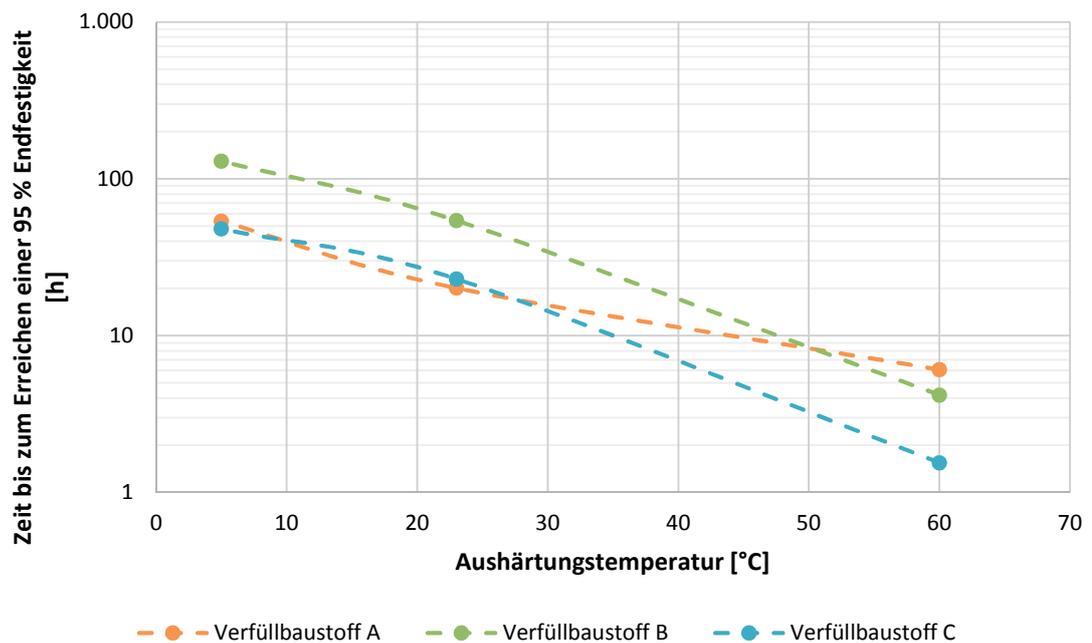
**Bild 14:** Zeit bis zum Erreichen einer äquivalenten Steifigkeit von 10.000 Pa in Abhängigkeit von der Aushärtungstemperatur der Verfüllbaustoffe

Für die Praxis ist es von größter Bedeutung das Zeitfenster für die Überarbeitung zu kennen, um z.B. die Größe von Bauabschnitten festzulegen oder die Asphaltmischgutbestellungen koordinieren zu können. Gegebenenfalls ist ein Haftvermittler vorzuhalten, wenn die Zeit nicht koordiniert werden kann. Das gewählte Steifigkeitsniveau zeigt eine deutliche Abhängigkeit aller Verfüllbaustoffe von der Aushärtungstemperatur, die beim Einbau vor allem von der Temperatur des Asphaltträgergerüsts abhängig ist.

Die Verfüllbaustoffe A und C weisen bei einer Anfangstemperatur für die Verfüllung zwischen 60 °C und 30 °C ein vergleichbares Zeitfenster auf. Bei abnehmender Temperatur driften die beiden Reaktionsharze auseinander, was auf die geringere Temperaturempfindlichkeit des Verfüllbaustoffes C zurückgeführt werden kann. Der Verfüllbaustoff B weist vor allem bei niedrigeren Temperaturen eine geringere Empfindlichkeit gegen thermische Beanspruchung auf. Es erscheint, dass mit abnehmender Temperatur der Verfüllbaustoff B und dessen optimierte Variante Verfüllbaustoff C ein äquivalentes Niveau anstreben.

#### Ende der Reaktion / 95% - Endfestigkeit:

Das Reaktionsende wurde bestimmt, indem der Zeitpunkt ermittelt wurde, bei dem 95% der gemessenen maximalen Steifigkeit erreicht wird. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da von anderen Reaktionsharzen bekannt ist, dass eine vollständige Vernetzungsreaktion mehrere Tage benötigen kann.



**Bild 15:** Zeit bis zum Erreichen einer 95 % Endfestigkeit aller Verfüllbaustoffe

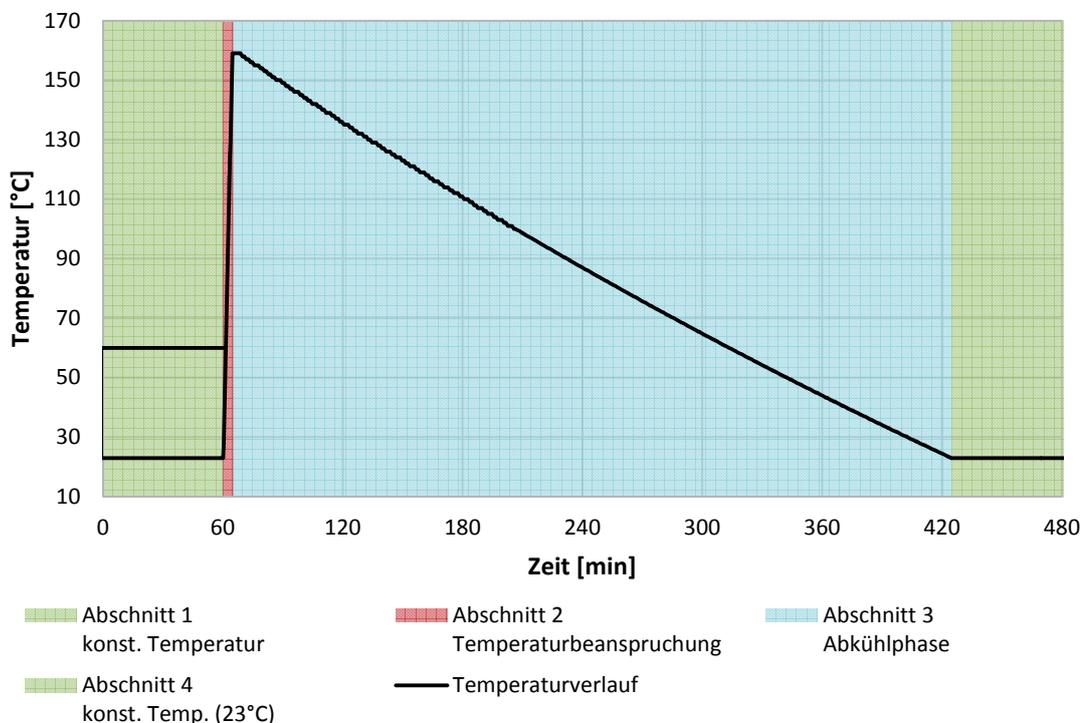
In der grafischen Auswertung ist erkennbar, dass der Verfüllbaustoff A zum Erreichen einer Endfestigkeit gegenüber den übrigen Reaktionsharzen eine geringere Temperaturempfindlichkeit aufweist. Der Verfüllbaustoff B und dessen optimierte Variante C zeigen eine höhere Temperaturempfindlichkeit mit einem parallel verschobenen Verlauf, welcher vertikal zu geringeren Zeiten versetzt erscheint. Dies führt dazu, dass bei niedrigeren Temperaturen bei den Verfüllbaustoffen A und C vergleichbare Eigenschaften vorliegen.

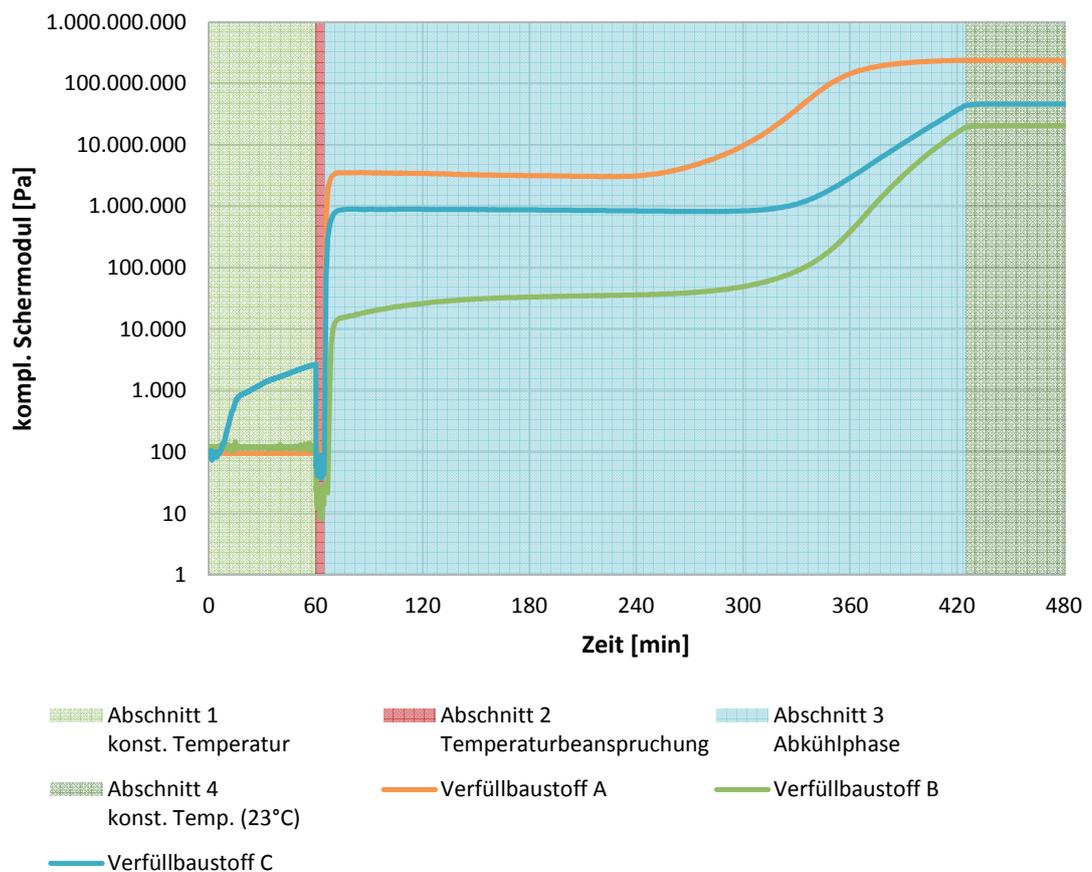
Die dargestellten Untersuchungen eignen sich zur Charakterisierung der Verfüllbaustoffe, haben aber für die Praxis wenig Relevanz da die Temperaturbedingungen nicht über solch lange Zeiträume konstant sind. Zumeist wird ein bis maximal zwei Stunden nach der Verfüllung des Traggerüstes mit der Überbauung begonnen. Für den Verfüllbaustoff in der 2 cm dicken HANV-Schicht bedeutet dies, dass bei der Überarbeitung mit Walzasphalt eine spontane thermische Beanspruchung auf ca. 160 °C eintritt. Um zu prüfen, welche Auswirkungen mit dieser Beanspruchung einhergehen, wurden weiterführende Messungen mit folgenden Randbedingungen durchgeführt:

**Tabelle 3:** Messbedingungen bei Temperaturbeanspruchung während der Reaktionskinetik

Zeit	1. Abschnitt	2. Abschnitt	3. Abschnitt	4. Abschnitt
Abschnittsdauer	Fall a: 1 Stunde Fall b: 2 Stunden	200 - 274 Sekunden	6 Stunden	48 Stunden
Messpunkt alle	10 Sekunden	10 Sekunden	60 Sekunden	5 Minuten
Beanspruchung	oszillierend			
Verformung	0,05 % (entspricht einer Auslenkung von ca. 0,00378 Grad)			
Frequenz	10 rad/s			
Temperatur	Konstant bei 23 °C (nur Fall a) oder 60 °C (Fall a und b)	Temperatur- steigerung um 0,5 Kelvin je Sekunde auf 160 °C	Logarithmische Temperatur- reduzierung auf 23 °C	Konstant bei 23 °C
Spalthöhe	1 mm			

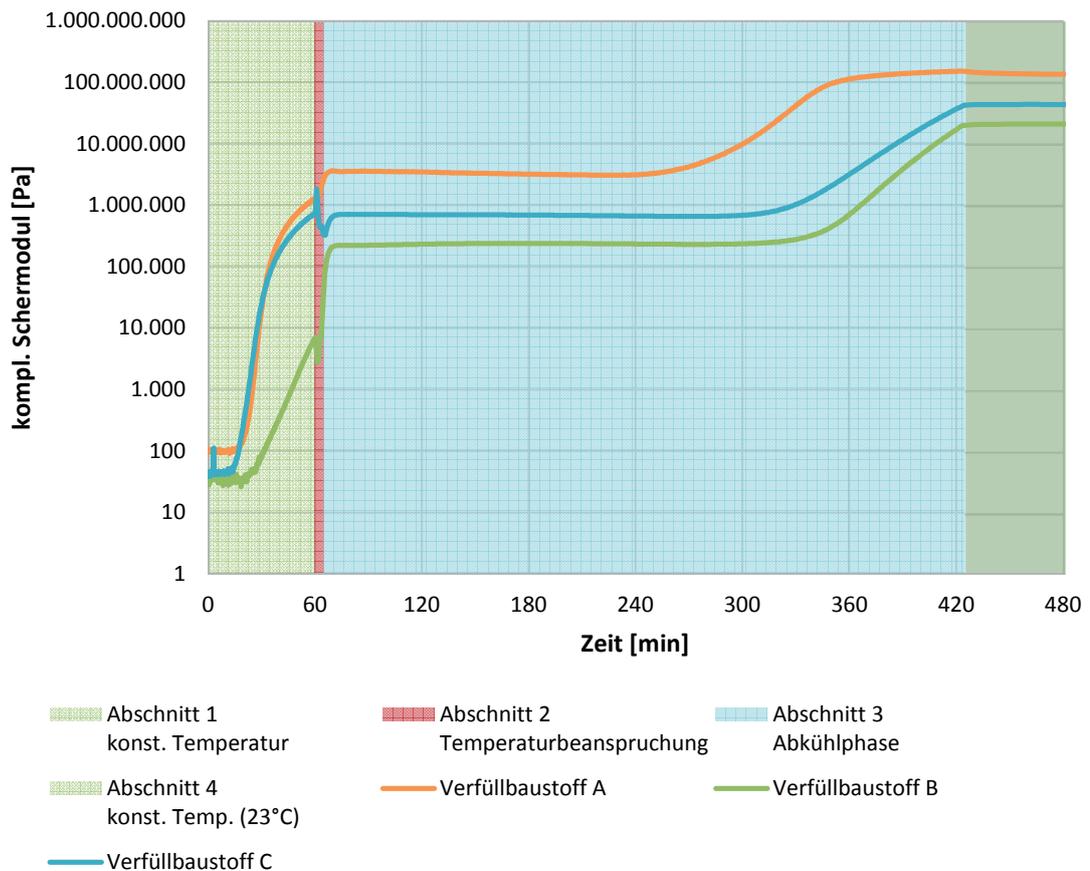
In Bild 16 ist exemplarisch der Temperaturverlauf für die Abschnitte grafisch dargestellt. Nach einer Stunde wird, ausgehend von dem jeweiligen Startniveau (23 °C oder 60 °C), die Prüftemperatur in kurzer Zeit auf 160 °C im Abschnitt 2 erhöht. Im Anschluss fällt die Temperatur im 3. Abschnitt auf 23 °C, was einer langsamen Abkühlung der Asphaltsschichten entsprechen soll. Im 4. Abschnitt wird die Temperatur konstant auf 23 °C gehalten.

**Bild 16:** Temperaturverlauf über die Abschnitte



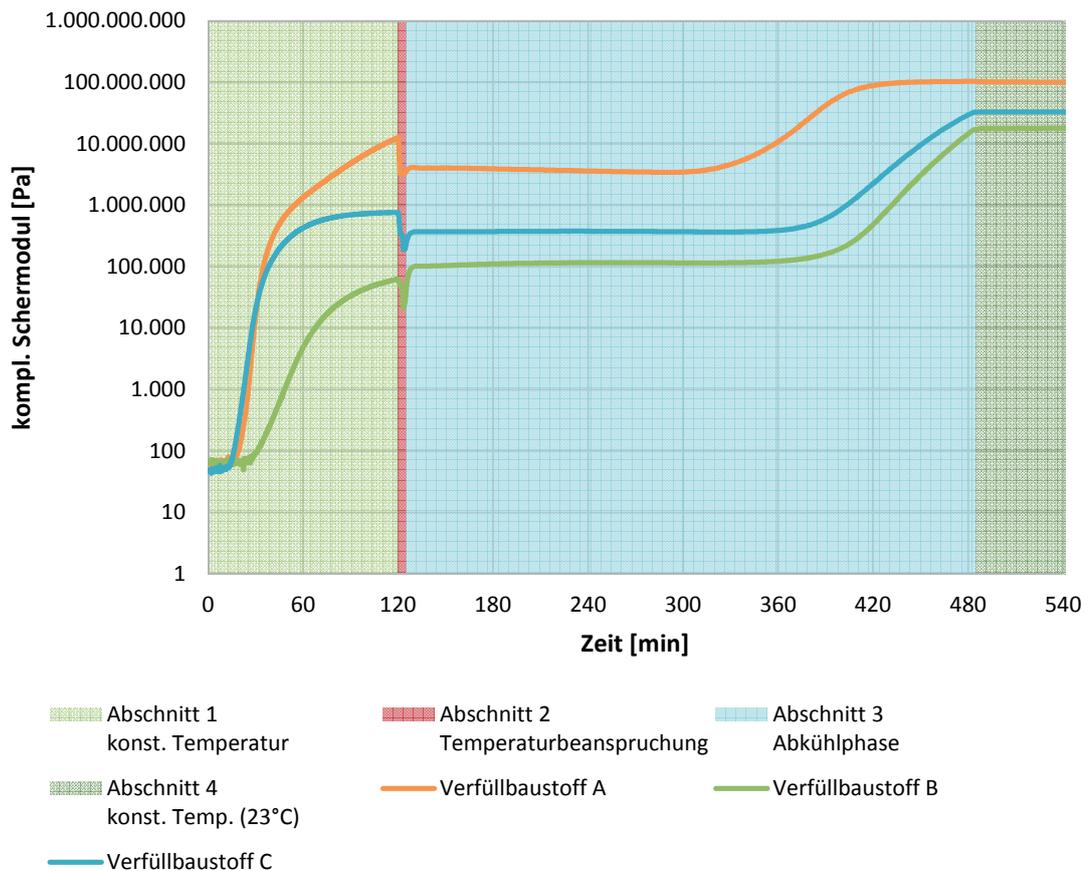
**Bild 17:** Reaktionskinetik bei Temperaturbeanspruchung nach 1 Stunde und einer Ausgangstemperatur von 23 °C, alle Verfüllbaustoffe

Mit Ausnahme des Verfüllbaustoffes C zeigen die Reaktionsharze keine Reaktion in der ersten Stunde. Erst nach der spontanen Temperatursteigerung kommt es zunächst zu einer Viskositätsabnahme und gleich darauf zu einer rapiden Vernetzung der Harze. Die Steifigkeiten der Verfüllbaustoffe A und C weisen dann in der Abkühlphase ein konstantes Niveau auf, welches das Erreichen einer Endfestigkeit anzeigt. Der Verfüllbaustoff B zeigt noch einen geringen Anstieg der Steifigkeit in der ersten Hälfte der Abkühlphase. Alle Verfüllbaustoffe zeigen zum Ende der Abkühlphase bei einer Temperatur von ca. 100 °C (Verfüllbaustoff A), ca. 60 °C (Verfüllbaustoff B) und ca. 50 °C (Verfüllbaustoff C) einen weiteren Anstieg des komplexen Schermoduls, welcher bei einer konstanten Temperatur von 23 °C (Abschnitt 4) gleich bleibt. Dieser letzte Effekt wird der thermischen Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften zugeordnet, die in der Abkühlphase angesprochen wird. Im Vergleich der Absolutwerte für die Endfestigkeit bei der isothermen Reaktionskinetik (vgl. Bild 10) weist der Verfüllbaustoff C nach Temperaturbeanspruchung eine niedrigere Endfestigkeit und der Verfüllbaustoff B eine höhere Endfestigkeit auf.



**Bild 18:** Reaktionskinetik mit Temperaturbeanspruchung nach 1 Stunde bei einer Ausgangstemperatur von 60 °C, alle Verfüllbaustoffe

Bei einer Starttemperatur von 60 °C bilden alle Reaktionsharze im Vergleich zu einer Starttemperatur von 23 °C zu einem frühen Zeitpunkt bereits erste Vernetzungssysteme aus, welche mit einer Steigerung der Steifigkeitsmodule einhergehen. Durch die Erhöhung der Temperatur wird die Reaktionsgeschwindigkeit gesteigert. Vorab kommt es zu einer kurzen zwischenzeitlichen Abnahme der Viskosität, bis die Reaktion beginnt. Durch die hohe Anfangstemperatur erscheint auch nach dem Temperatursprung die Vernetzungsreaktion beim Verfüllbaustoff B vollständig abgeschlossen. Im letzten Drittel der Abkühlphase kommt es zu thermischen Einflüssen, welche das komplexe Schermodul mit abnehmender Temperatur steigen und bei konstanter Temperatur auf einem Niveau verlaufen lassen. Im Vergleich zur isothermen Reaktionskinetik ist die Relation der Endfestigkeiten vergleichbar aber das Niveau unterschiedlich.



**Bild 19:** Reaktionskinetik mit Temperaturbeanspruchung nach 2 Stunde bei einer Ausgangstemperatur von 60 °C, alle Verfüllbaustoffe

Erfolgt die Temperaturbeanspruchung nach einer Aushärtungsdauer von 2 Stunden bei 60 °C, kommt es zu vergleichbaren Effekten wie nach 1 Stunde Aushärtung bei 60 °C. Nach der Temperaturbeanspruchung ist jedoch beim Verfüllbaustoff A und C eine Steifigkeitsabnahme erkennbar, welche aufgrund der fortgeschrittenen Aushärtung den thermischen Einflüssen zugeordnet werden kann und nicht einem unterschiedlichen Vernetzungsgrad.

#### 4.2.3 Rheologisches Verhalten bei unterschiedlichen Aushärtungsbedingungen

Die Gebrauchseigenschaften der Verfüllbaustoffe nach Erreichen der Endfestigkeit wurden mit einer Festkörpereinspannung (siehe Bild 20) im DSR untersucht. Ein Schwerpunkt dieser Untersuchungsmethodik war die Quantifizierung von möglichen Hysterese-Effekten durch unterschiedliche Aushärtungsbedingungen auf die Gebrauchseigenschaften. Hierzu wurden die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit während der Aushärtung der Prüfstäbe in einem Klimaschrank reguliert. Im Anschluss wurden Messungen im Temperaturbereich von 60 °C bis -20 °C durchgeführt.



**Bild 20:** Festkörpereinspannung - Solid-Rectangular-Fixture (SRF)

Zur Konditionierung wurden die in Tabelle 4 dargestellten Kombination aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit für den ersten Tag der Aushärtung festgesetzt. Im Anschluss wurden die Prüfkörper für 6 Tage bei 23 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % gelagert. Am 8. Tag erfolgte die Prüfung.

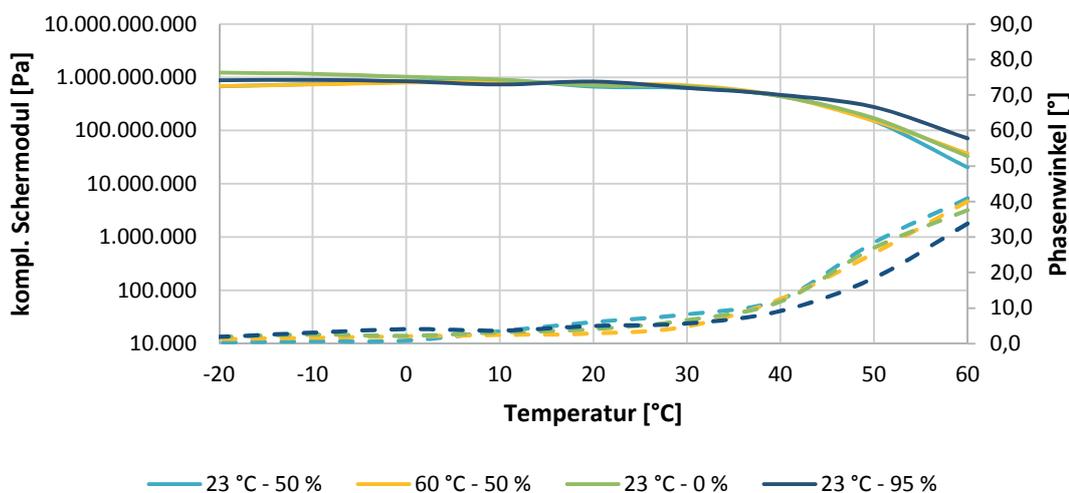
**Tabelle 4:** Kombinationen der Konditionierung aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Temperatur		23 °C	60 °C
relative Luftfeuchtigkeit	0 %	X	
	50 %	X	X
	95 %	X	

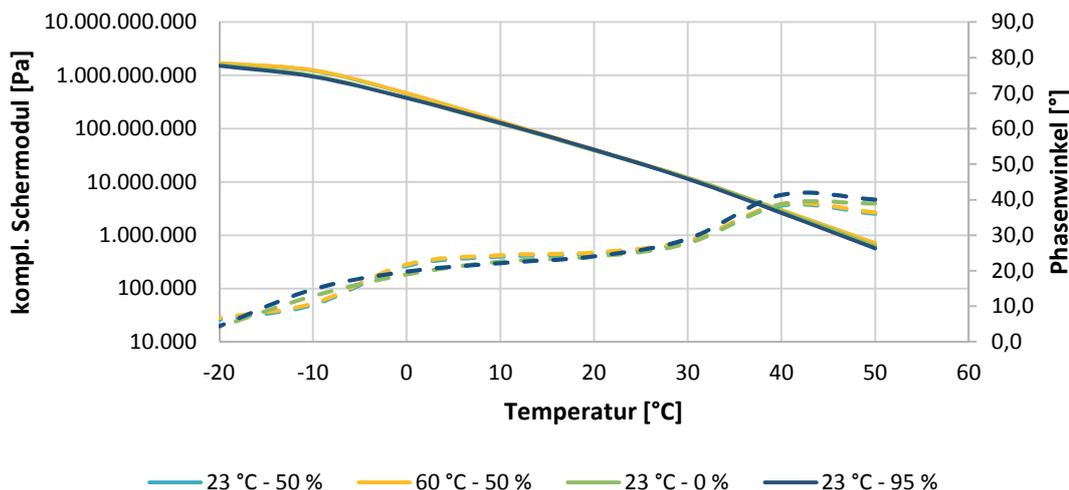
Die Messungen im Dynamischen Scherrheometer erfolgten mit den in Tabelle 5 dargestellten Prüfbedingungen. Nach vorherigen Versuchen kann mit einer kraftgeregelten Steuerung der Schubspannung von 500 Pa die Messung im linear-viskoelastischen Bereich der Verfüllbaustoffe erfolgen. Eine konstante Zugkraft von 0,05 N stellt nur sicher, dass durch die Abkühlung keine zu starken kryogenen Kräfte in der Probe wirken und eine Nachregulierung über die Probekörperhöhe stattfindet. Jeder Versuch wurde als Doppelbestimmung durchgeführt. Nachfolgend sind die Isothermen zusammengestellt.

**Tabelle 5:** Messbedingungen der Festkörpereinspannung

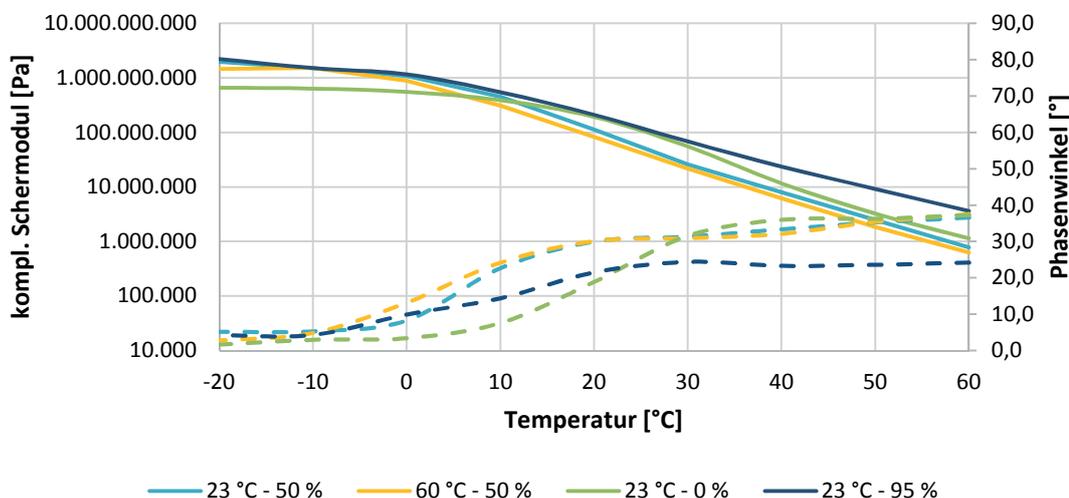
Kennwert	Einstellung
Temperatur	von 60 °C auf -20 °C Messung alle 10 Kelvin Umstellung mit 1 K/Min und einer Temperatureinstellungsdauer von 15 Minuten im Konvektionsofen
Beanspruchung	oszillierend
Schubspannung	500 Pa
Frequenz	10 rad/s
Zugkraft	0,05 N



**Bild 21:** Isochronen des Verfüllbaustoffes A nach unterschiedlichen Konditionierungen (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)

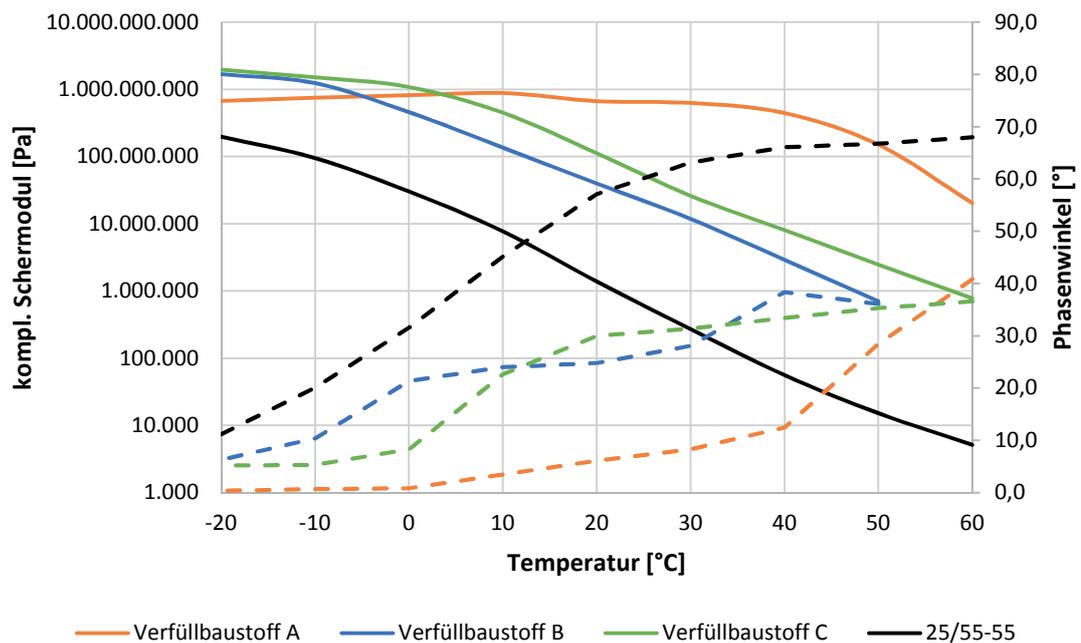


**Bild 22:** Isochronen des Verfüllbaustoffes B nach unterschiedlichen Konditionierungen (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)



**Bild 23:** Isochronen des Verfüllbaustoffes C nach unterschiedlichen Konditionierungen (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)

Anhand der Isochronen ist erkennbar, dass sich die Verfüllbaustoffe in ihrem viskoelastischen Verhalten deutlich voneinander unterscheiden. Der Temperaturbereich zwischen 60 °C und -20 °C wurde gewählt, um einen praxisrelevanten Bereich abzudecken. Das komplexe Schermodul ist bei den Messungen vergleichbar mit einer Steifigkeit. Der Phasenwinkel charakterisiert das viskoelastische Verhalten eines Baustoffes. Ein Phasenwinkel von 0 ° bedeutet, dass ein ideal-elastisches Verhalten vorliegt, ähnlich wie bei Stahl. Ein Phasenwinkel von 90 ° steht für ein ideal-viskoses Verhalten, vergleichbar mit Wasser. Ein Niveau von 45° steht für ein ausgewogenes visko-elastisches Verhalten. Insgesamt zeigen die Isochronen ein elastischeres Verhalten und eine höhere Steifigkeit gegenüber z.B. im Straßenbau verwendeten Bindemitteln auf Bitumenbasis hin (vgl. Bild 24).



**Bild 24:** Isochronen der Reaktionsharze nach einer Aushärtung von 7 Tagen bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit und Kennwerte eines polymermodifizierten Bitumens 25/55-55 A (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)

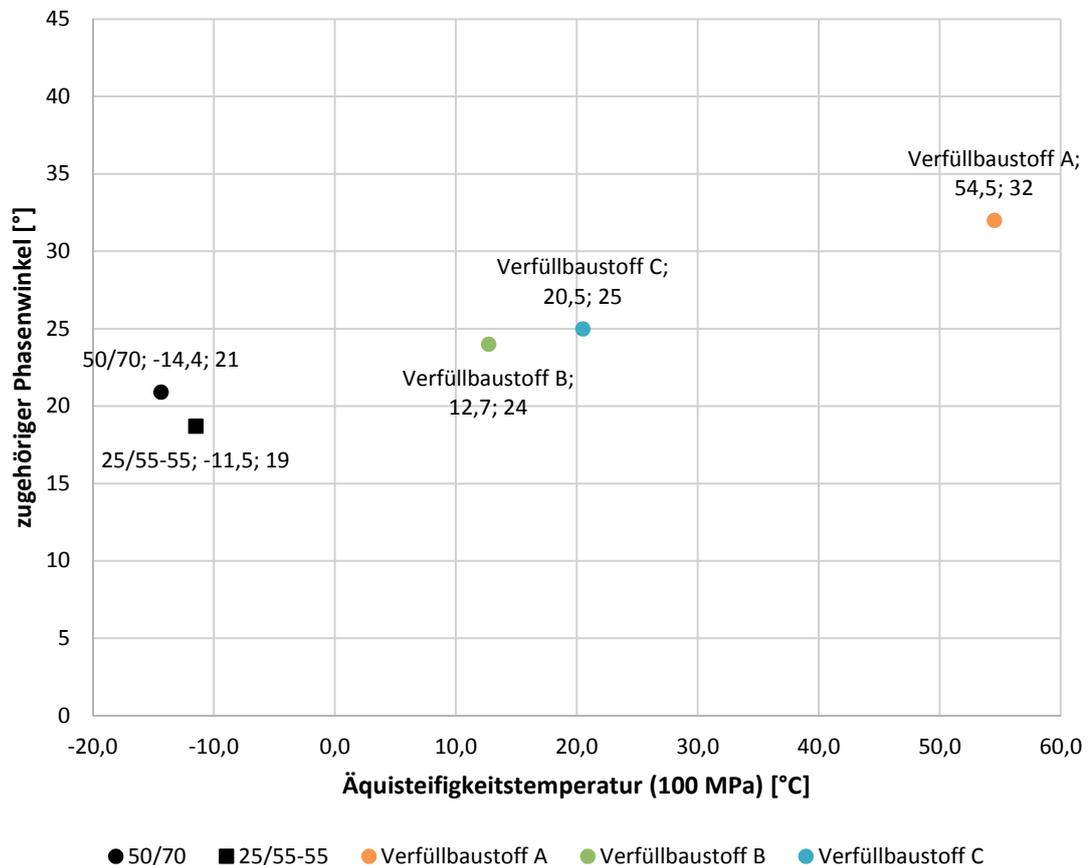
Der Verfüllbaustoff A (vgl. Bild 21) weist erst bei hohen Temperaturen ab ca. 40 °C eine Abnahme der Steifigkeit und eine Zunahme des viskosen Verhaltens auf. Ab diesem Temperaturbereich sind Unterschiede zwischen den konditionierten Proben erkennbar, wobei die Aushärtungstemperatur keinen Unterschied im Gebrauchsverhalten nach sich zieht. Nur eine erhöhte Feuchtigkeit führt zu einer versteifenden Wirkung und einem elastischeren Verhalten. In tiefen Temperaturbereichen sind keine Änderungen erkennbar.

Die Messungen mit dem Verfüllbaustoff B (vgl. Bild 22) konnten erst ab einer Temperatur von 50 °C durchgeführt werden, da das Reaktionsharz bei höheren Temperaturen überwiegend viskose Eigenschaften aufweist und eine zu geringe Steifigkeit für das Messsystem hat. Im Vergleich zum Verfüllbaustoff A weist der Verfüllbaustoff B eine höhere thermische Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften auf. Mit zunehmender Temperatur fällt die Steifigkeit exponentiell und das viskose Verhalten nimmt stark zu.

Der optimierte Verfüllbaustoff C (vgl. Bild 23) weist ein vergleichbares Verhalten auf, wobei die viskosen Eigenschaften bei hohen Temperaturen gedämpft werden. Dies ist sehr gut an der plateauförmigen Ausbildung des Phasenwinkels erkennbar. Bei zunehmender Luftfeuchtigkeit verändern sich die rheologischen Eigenschaften des Harzes deutlich in einen elastischeren Bereich mit höheren Steifigkeiten. Auch eine

Abnahme der Luftfeuchtigkeit führt vor allem bei tiefen Temperaturen zu Veränderungen des rheologischen Verhaltens, wobei ein elastischeres Verhalten mit einer geringeren Steifigkeit einhergeht.

Um die Unterschiede zwischen den Verfüllbaustoffen besser charakterisieren zu können, wurde anhand der Messdaten eine Äquisteifigkeitstemperatur bei einem Niveau des komplexen Schermoduls von 100 MPa mit dem zugehörigen Phasenwinkel berechnet (vgl. Bild 25). Das Niveau wurde gewählt, um eine Extrapolation zu vermeiden. Dem Bild wurden zur Orientierung die Messergebnisse eines Straßenbaubitumens und eines polymermodifizierten Bitumens beigefügt. Es ist erkenntlich, dass die Verfüllbaustoffe deutlich steifer konzipiert sind, als die üblichen bitumenhaltigen Bindemittel. Durch die Optimierung des Verfüllbaustoffes B zur Variante C ist aus dem Bild 22 und Bild 23 ein horizontaler Versatz bei sonst vergleichbaren rheologischen Eigenschaften erkennbar. Bei einem Niveau der Steifigkeit von 100 MPa kann dieser Versatz mit 8 Kelvin quantifiziert werden. Der Phasenwinkel ist mit 1 ° Unterschied nahezu konstant geblieben. Der Verfüllbaustoff A weist eine deutlich höhere Äquiviskositätstemperatur auf, einhergehend mit einem stärker viskosen Verhalten.



**Bild 25:** Äquisteifigkeitstemperatur mit zugehörigen Phasenwinkel bei einer Aushärtungstemperatur von 23 °C und 50 5 rel. LF – inkl. einem Straßenbaubitumen 50/70 und einem polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A zum Vergleich

#### 4.2.4 Schnellverfahren zur Prüfung der Erhärtungseigenschaften vor Ort

Zur Prüfung und Ableitung der Viskosität als Wareneingangsprüfung auf der Baustelle wurden Verfahren getestet, welche Rückschlüsse auf die Konsistenz der Verfüllbaustoffe während der Aushärtung zulassen. An jedes der betrachteten

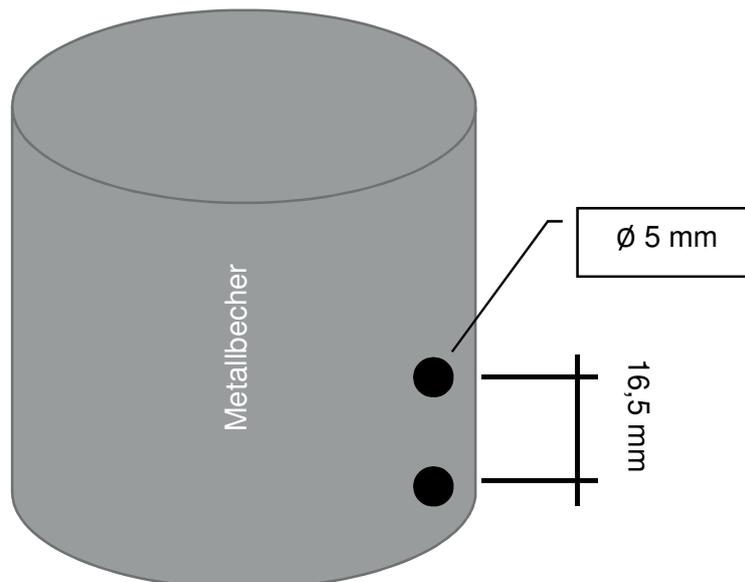
Verfahren wurde die Anforderung gestellt, dass die mit Reaktionsharz in Berührung kommenden Prüfmittel jederzeit, z.B. in einem Baumarkt, beschafft werden können. Dies sollte gewährleisten, dass ohne aufwändige Messtechnik die Prüfung vor dem Einbau durchführbar ist und die Prüfmittel als Einwegprodukte kostengünstig ersetzt werden können.

Als Prüfverfahren wurden der Auslaufversuch, eine Penetration und ein Kugelversuch an den Verfüllbaustoffen A und C getestet. Nachfolgend sind die Verfahren und Erkenntnisse bei der Anwendung mit Reaktionsharz beschrieben.

(1) Auslaufversuch:

Der Auslaufversuch ist ein gängiges Verfahren zur relativen Viskositätsmessung (vgl. zum Auslaufverhalten von Wasser) von nahezu ideal viskosen Stoffen und kann mit haushaltsüblichen Mitteln schnell umgesetzt werden.

Für den Auslaufversuch wurde ein Metallbecher (300 ml) mit zwei Löchern in unterschiedlicher Höhe präpariert. Der Lochabstand und Durchmesser wurde solange variiert, bis das Wasser eine Durchlaufzeit zwischen den beiden Löchern von ca.  $15 \pm 1$  Sekunden bei Raumtemperatur benötigt. Hierzu eignete sich ein Lochabstand von 16,5 mm und ein Durchmesser von 5 mm (vgl. Bild 26).



**Bild 26:** Schematische Darstellung der Bohrungen im Metallbecher

Der Abstand konnte kontinuierlich oft mit einer Lehre auf eine Dose reproduziert werden. Die Grate vom Bohren wurden vor Beginn der Prüfung mit einer Rundfeile entfernt.

Die Durchführung beim Versuch ist einfach und auch mit Reaktionsharz durchführbar. Der Becher wird bis über beide Löcher gefüllt. Nachdem aus dem obersten Loch keine Flüssigkeit mehr austritt beginnt die Auslaufzeit bis am unteren Loch keine Prüflüssigkeit mehr austritt. Hierbei hat der Durchmesser des Gefäßes keine Rolle, solange die Druckhöhe durch die gleichbleibenden Löcher konstant gehalten wird.

Bei Prüfung der Reaktionsharze konnte festgestellt werden, dass durch die höhere Konsistenz der frisch angemischten Reaktionsharze kein eindeutiger Beginn und Ende der Prüfung festgestellt werden kann, da der Verfüllbaustoff nicht eindeutig wie Wasser aus den Löchern austritt. Ein größerer Lochdurchmesser würde keinen reproduzierbaren Wert für das Wasser liefern.

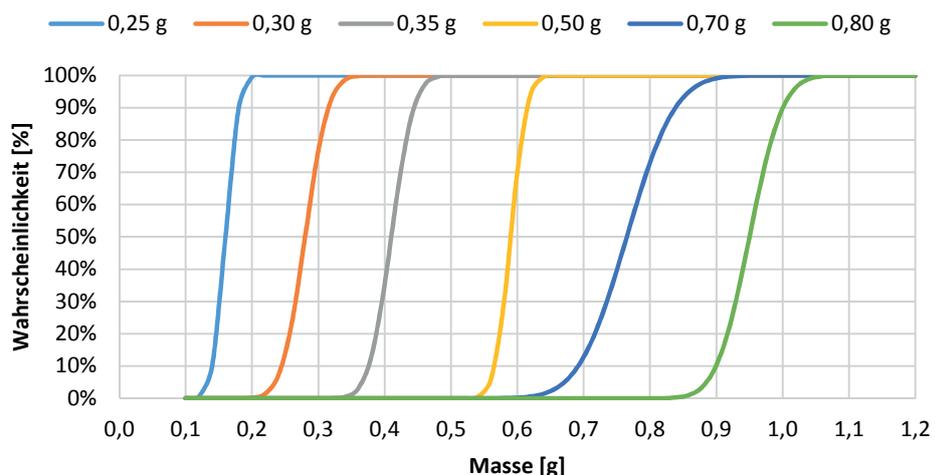
Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Einfüllhöhe des Reaktionsharzes Einfluss auf das Aushärtungsverhalten nimmt. Es wird vermutet, dass die innere exotherme Reaktion mit zunehmenden Volumen steigt und somit die Reaktion beschleunigt, ähnlich wie bei der isothermen Reaktionskinetik im Abschnitt 4.2.2 vorgestellt. Aus diesem Grund wurde das Verfahren als nicht geeignet angesehen.

(2) Penetration:

Aus dem Bereich der Zementprüfung ist bekannt, dass die Erstarrungszeiten mit einem Penetrometer geprüft werden können [9]. Hierzu wird eine Nadel zur Messung des Erstarrungsbeginns und ein Tauchstab zur Ermittlung der Normsteifigkeit verwendet. Bei den vorliegenden Verfüllbaustoffen liegt eine weitaus geringere Viskosität vor. Eine Idee war die Verwendung von Nietkopfschrauben mit einem breiten Kopf und geringen Eigengewicht. Nach ersten Tastversuchen konnte festgestellt werden, dass die Auflast des Penetrometers und der Schraube zu hoch ist und die modifizierte Nadel nur durchsinkt. Bei weiteren Versuchen wurden Unterlegscheiben mit einem Außendurchmesser von 37 mm zur Erhöhung der Auflastfläche genutzt. Diese reichte nicht aus, um das Eindringen der Nadel für differenzierte Penetrationsniveaus zu erhalten. Weitergehende Modifizierungen am Prüfsystem, z.B. eine weitere Vergrößerung der Fläche und eine Reduzierung der Auflast, wurden aufgrund der schlechteren Reproduzierbarkeit nicht weiter verfolgt. Aus diesem Grund wurde das Verfahren als nicht geeignet angesehen.

(3) Kugelversuch

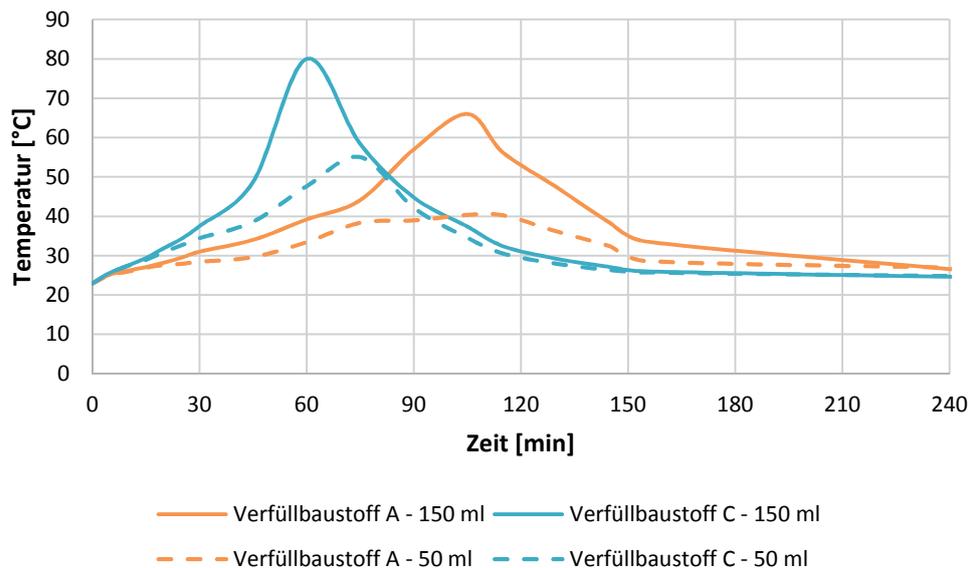
In Anlehnung an eine Kugelharfe zur Messung der Fließgrenze von Suspensionen [10] ist eine Verwendung von Blei aus dem Anglerbedarf denkbar, um eine Konsistenz anzusprechen. Aus dem Baumarkt wurde ein handelsübliches Set an Bleikugeln unterschiedlicher Massen zwischen 0,25 g und 0,80 g beschafft. Aus jeder Kugel-Gruppe wurden 20 Kugeln zufällig gewählt und die Verteilung der Masse bestimmt. Die Einzelergebnisse sind der Anlage 3 beigefügt. Nachfolgend sind die Summenlinien graphisch aufbereitet dargestellt.



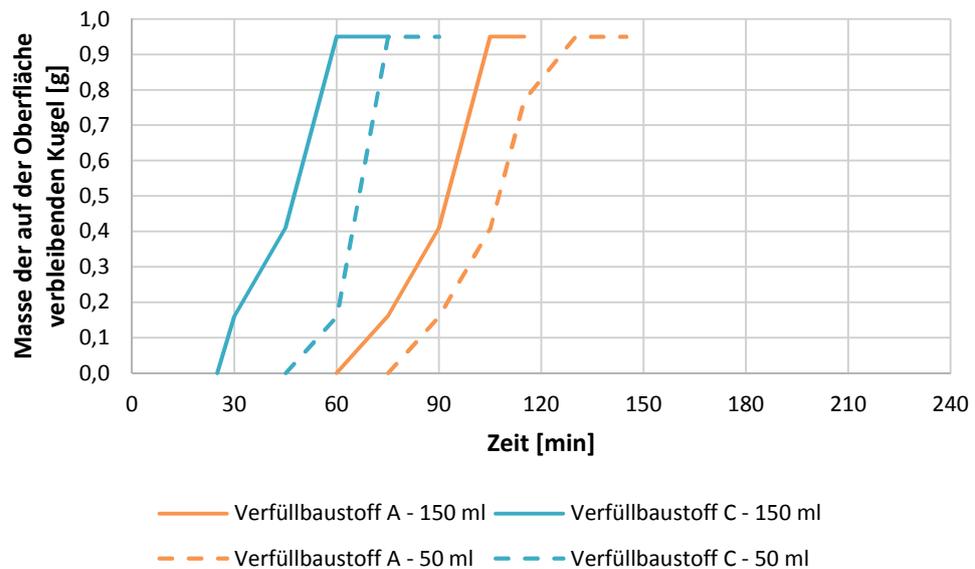
**Bild 27:** Summenwahrscheinlichkeit der Masse jeder Kugel-Gruppe

Die mittleren Massen der Bleikugeln weisen zum Teil deutliche Abweichungen von den Herstellerangaben auf. Der Variationskoeffizient (vgl. Tabelle 23) der jeweiligen Kugel-Gruppe liegt mit unter 10 % sehr günstig im Sinne der Streuung.

Für die Untersuchungen wurden die Ausgangskomponenten der Verfüllbaustoffe A und C, sowie die benötigten Prüfmittel für 12 Stunden bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte gelagert. Im Anschluss wurden Mischungen hergestellt und auf jeweils zwei Dosen mit einem Nennvolumen von 50 ml ( $\varnothing$  6,5 cm) und 150 ml ( $\varnothing$  9,0 cm) aufgeteilt. Die Dosen wurden während der Aushärtung im Klimaschrank bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte gelagert. In regelmäßigen Zeitabständen wurde der Kugelfallversuch durchgeführt und die Temperatur der Oberfläche mit einem Infrarotthermometer gemessen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass ein direkter Vergleich zur Messung der Topfzeit nicht gegeben ist, da der Versuch nach TP-BEL-EP – Abschnitt 3.2.3 [11] ein anders Volumen und eine andere Temperaturmessung beinhaltet. Bei jedem Versuch wurde mit der Kugel mit geringster Masse aus einer Fallhöhe von  $2,0 \pm 0,5$  cm geprüft, ob die Kugel für mindestens 3 Sekunden auf der Oberfläche bleibt. Bei Erfüllung dieser Prüfung wurde die nächst größere Kugel im Anschluss mit den gleichen Randbedingungen verwendet. Wenn die maximale Kugelmasse erreicht war, wurde bei der nächstfolgenden Messung das Ergebnis noch einmal bestätigt. Die Einzelwerte des Versuches sind der Anlage 3 beigefügt. Nachfolgend sind die Ergebnisse graphisch aufbereitet zusammengefasst und werden erörtert.



**Bild 28:** Verlauf der Oberflächentemperatur während der Aushärtung



**Bild 29:** Ergebnisse des Kugelfallversuches

Die Temperaturzunahme infolge der exothermen Reaktion ist abhängig vom Volumen des Verfüllbaustoffes und nimmt Einfluss auf die Geschwindigkeit der Vernetzungsreaktion. Der Zeitpunkt und das Niveau des Zenits der Temperatur sind abhängig vom Reaktionsharz. Beim Verfüllbaustoff C kann unabhängig vom Volumen im Mittel eine um 14 Kelvin höhere Temperatur gegenüber dem Verfüllbaustoff A festgehalten werden. Bei geringen Volumina bildet sich beim Verfüllbaustoff A tendenziell ein Plateau beim Verlauf der Temperatur aus, welches eine lokale Spitze aufweist.

Mit Anstieg der Temperatur nimmt die Konsistenz bzw. Oberflächenspannung der Verfüllbaustoffe zu, sodass die Kugeln auf der Oberfläche verbleiben. Durch den rapiden Anstieg bleiben innerhalb von Minuten alle Gewichtsklassen der Kugeln für mindestens 3 Sekunden auf der Oberfläche.

Bei Erreichen des Zenits der Temperatur ist die Oberflächenspannung aller Reaktionsharze so hoch, dass die Kugeln mit einer Nennmasse von 0,95 g für 3 Sekunden auf der Oberfläche bleiben (vgl. Bild 30).



**Bild 30:** Oberfläche der Prüfkörper nach 180 Minuten  
(links: Verfüllbaustoff A, rechts: Verfüllbaustoff C)

Ob der Schnelltest eine Aussage zur Überarbeitbarkeit zulässt, wird im Abschnitt 5.4 erörtert.

#### 4.2.5 Resümee

Anhand der bisherigen Ergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

- Das Aushärtungsverhalten der Reaktionsharze ist stark abhängig von der Temperatur und dem Volumen der Probe des Verfüllbaustoffes.
- Mit zunehmender Temperatur kann die Reaktionskinetik beschleunigt werden.
- Durch Volumenzunahme der Messprobe erfolgt eine autonome Steigerung der Temperatur infolge exothermer Reaktionen
- Das rheologische Verhalten der drei Verfüllbaustoffe ist signifikant unterschiedlich
- Die Luftfeuchtigkeit zeigte einen hohen Einfluss auf die späteren Gebrauchseigenschaften.

### 4.3 **Untersuchungen an der HANV-Schicht**

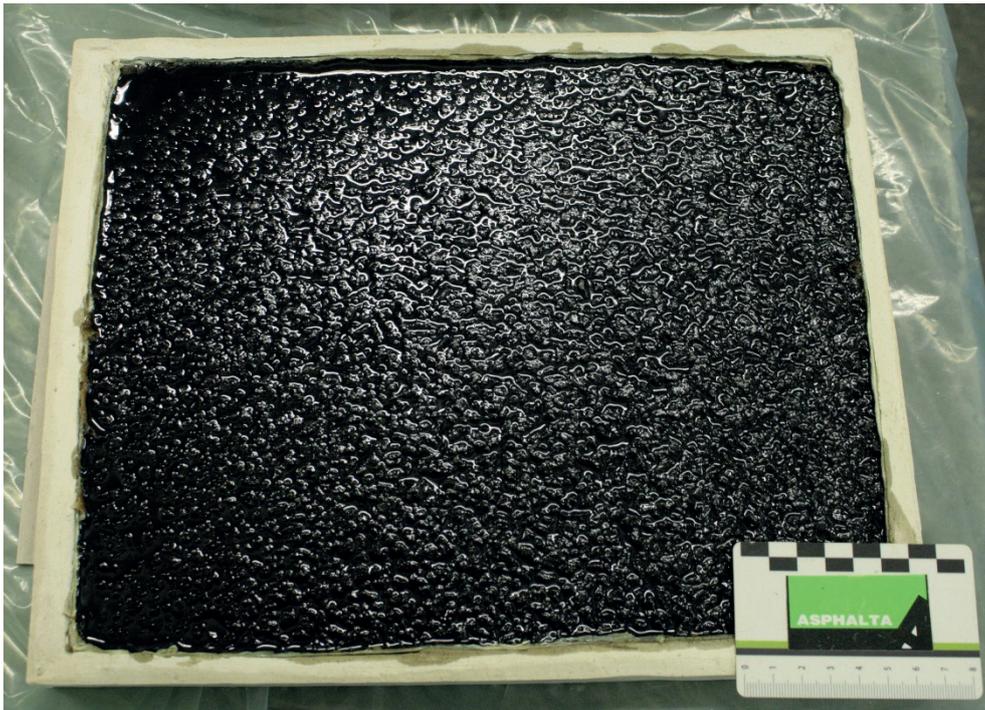
#### 4.3.1 Auswahl der Komponenten und Festlegungen für die Durchführung

Für die Untersuchungen an der HANV Schicht wurde der Verfüllbaustoff C gewählt, da dieser ein viskoseres Verhalten aufweist als der Verfüllbaustoff A aber schneller erhärtet als der Verfüllbaustoff B. Zu den Eigenschaften der Verfüllbaustoffe A und B in einer HANV-Schicht liegen außerdem bereits Kenntnisse aus Grundprüfungen im Sinne der H HANV vor.

Für die weiterfolgenden Verfüllvorgänge, hier vor allem die Überarbeitbarkeit mit Walzasphalt zu nennen, wurden die Messergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 4.2.2 und 4.2.3) bereits genutzt, um den Vernetzungsgrad der Reaktionsharze vor der Überarbeitung zu quantifizieren.

#### 4.3.2 Herstellung der Probekörper

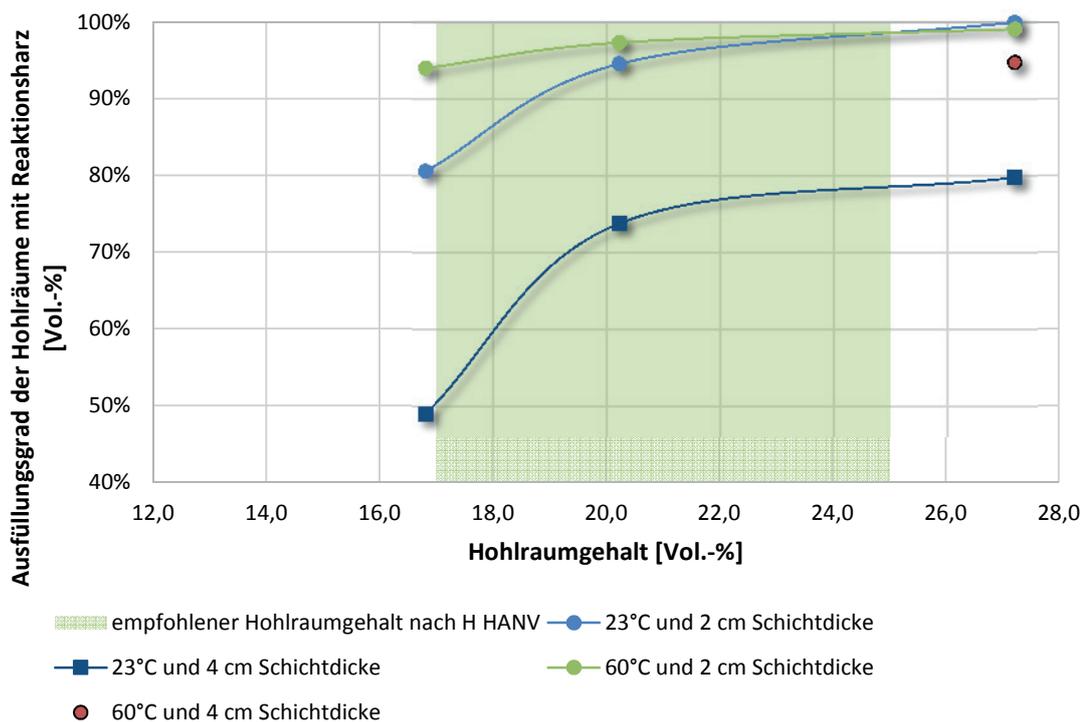
Die Probekörper des Asphaltträgerüstes wurden in einem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt und gegen ein Auslaufen des Verfüllbaustoffes gesichert (vgl. Bild 31). Vor Beginn des Verfüllvorganges wurden die Platten für 5 h bei der anvisierten Verfülltemperatur in einem Klimaschrank mit 50 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Das Verfüllen der vortemperierten Platten erfolgte innerhalb von 5 Minuten. Im Anschluss wurden alle Platten für 2 h bei der Verfülltemperatur (60 °C oder 23 °C) und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit und für 7 d bei Normklima (23 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit) nachgelagert bevor weitere Untersuchungen durchgeführt wurden. Die Temperierung für die Untersuchungen erfolgte einheitlich für 24 h bei der vorgesehenen Prüftemperatur.



**Bild 31:** Vollständig verfülltes ATG in Gipsschalung

#### 4.3.3 Verfüllbarkeit des ATG

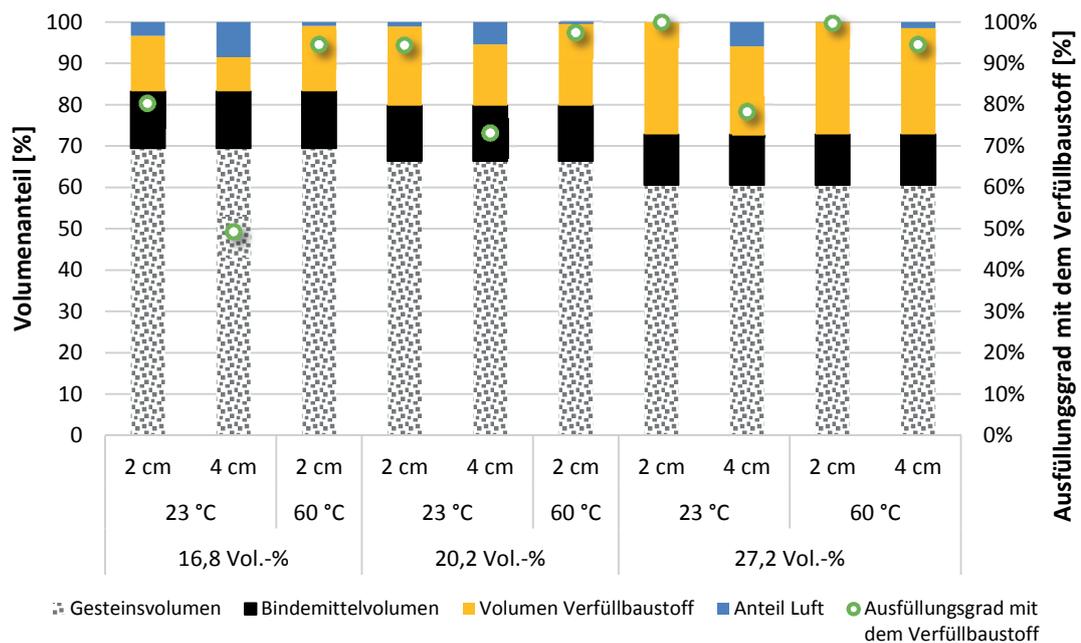
Für die Untersuchungen an der HANV-Schicht wurden eine Vielzahl an Probeplatten hergestellt und mit Reaktionsharz verfüllt. Über den Hohlraumgehalt und die bekannte Menge an penetriertem Reaktionsharz, welche über Rückwägung der Platten bestimmt wurde, kann der Ausfüllungsgrad der Hohlräume berechnet werden. Die hierzu genutzten Platten entsprechen hinsichtlich der volumetrischen Eigenschaften den im Abschnitt 4.1.1 benannten Probeplatten. In Abhängigkeit von der anvisierten Geometrie der Prüfkörper, wurden die Platten in unterschiedlichen Dicken hergestellt. Nachfolgend sind die Ergebnisse graphisch aufbereitet dargestellt.



**Bild 32:** Ergebnisse der Verfüllbarkeit mit dem Verfüllbaustoff C bei unterschiedlichen Temperaturen, Plattendicken und Hohlraumgehalten vor dem empfohlenen Bereich des Hohlraumgehaltes nach H HANV

Mit zunehmendem Hohlraumgehalt steigt der Ausfüllungsgrad asymptotisch an. Bei einer Plattendicke von 2 cm werden mit einem Hohlraumgehalt von ca. 28 Vol.-% nahezu 100 % der Hohlräume im ATG geflutet. Bei doppelter Plattendicke erscheint nur noch ein Ausfüllungsgrad von 80 % erreichbar zu sein. Dieser Effekt wird einerseits auf die zunehmenden Reibungskräfte im ATG und andererseits auf den höheren Luftanteil zurückgeführt, welcher aus dem ATG verdrängt werden muss. Ersteres kann mit zunehmender Temperatur des ATG kompensiert werden, wodurch die Viskosität des Verfüllbaustoffes reduziert wird. Dann sind Ausfüllungsgrade von nahezu 95 % möglich.

Für die Interpretation der Ergebnisse bedeutet dies, dass die Platten mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten auch einen unterschiedlichen Ausfüllungsgrad aufweisen. Der direkte Vergleich zwischen den verfüllten Systemen ist daher nur unter Berücksichtigung der volumetrischen Kennwerte möglich. Nachfolgend sind diese für die untersuchten Varianten in Bild 33 zusammengestellt. Die Volumenanteile des Reaktionsharzes in der Platte betragen 7,5 Vol.-% bis 27,5 Vol.-%.



**Bild 33:** Volumetrische Zusammensetzung der HANV-Prüfkörper und Ausfüllungsgrad

#### 4.3.4 Eigenschaften der Schicht nach H HANV

Zur Grundcharakterisierung der HANV-Schicht wurden ausgewählte Untersuchungen nach der Tabelle 4 der H HANV an einer mit den unterschiedlichen Verfüllbaustoffen verfüllten Referenzvariante des Asphalttraggerüsts durchgeführt. Nachfolgend sind wesentliche Untersuchungsergebnisse zusammengestellt.

Zur Untersuchung, im Sinne der Tabelle 4 der H HANV, wurde ein Asphalttraggerüst mit einem Hohlraumgehalt von ca. 25 Vol.-% genutzt. Bei den Prüfkörpern wurde die Verfülltemperatur, soweit nicht anders angegeben, entsprechend dem Normklima der DIN 50014 auf 23 °C konstant gehalten [8].

Die Ergebnisse in Tabelle 6 lassen die Unterschiede der drei Verfüllbaustoffe auf die Schichteigenschaften deutlich erkennen. Der Verfüllbaustoff A mit einer signifikant höheren Steifigkeit führt bei den Abreißfestigkeiten, der Schubfestigkeit und den Biegefestigkeiten zu einem höheren Messwertenniveau.

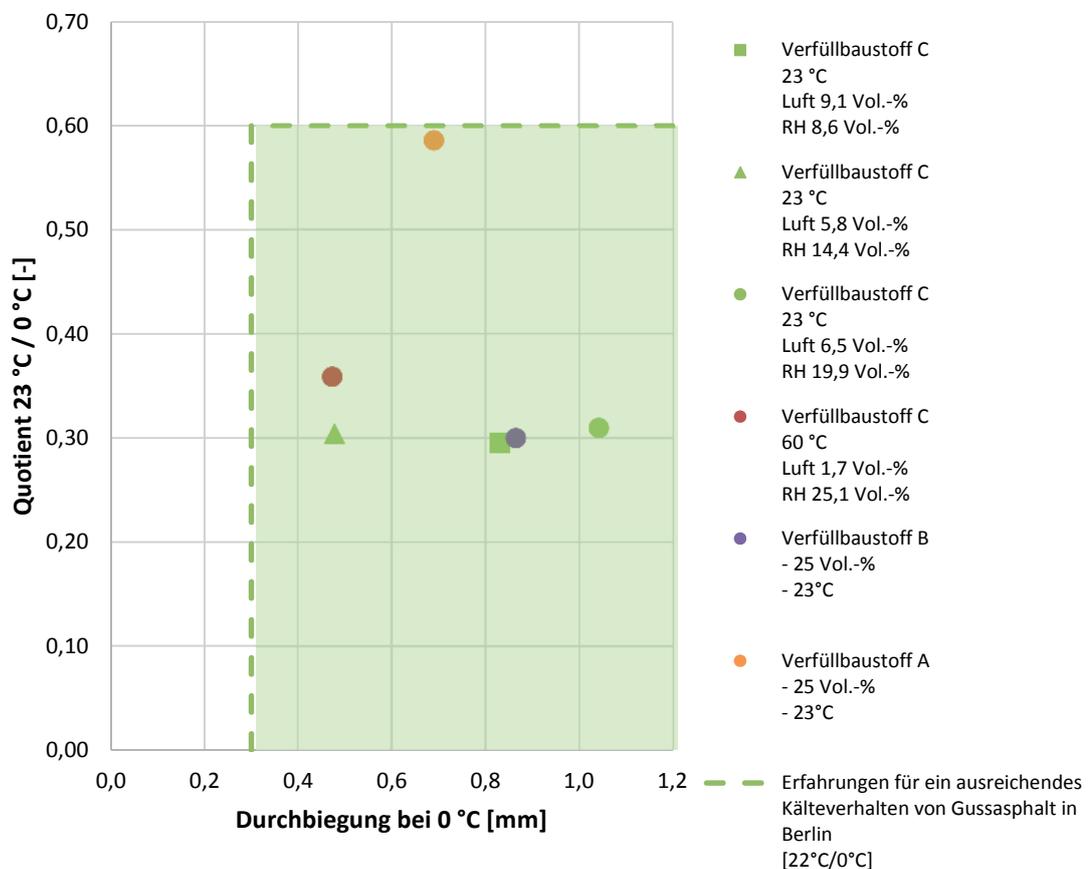
Tabelle 6: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse nach Tabelle 4 der H HANV

Nr.	Art der Prüfung / Prüfgröße	Prüfverfahren	Prüfergebnis der Verfüllbaustoffe			Empfehlung bei Grundprüfung nach H HANV
			A aus [23]	B aus [24]	C	
1	Vollständige Verfüllung der HANV-Schicht bei 12 °C und 60 °C, Dicke der HANV-Schicht 2 cm	Ist eine vollständige Verfüllung nach optischer Prüfung zu erwarten?	Ja	Ja	Ja	Keine zugänglichen Hohlräume
3	Abreißfestigkeit : Systemaufbau: Betondecke – HANV-Schicht	DIN EN 13596 [N/mm <sup>2</sup> ]	3,0	1,8	1,8	≥ 0,7 N/mm <sup>2</sup>
		Prüfung bei 8 °C	2,2	1,1	0,9	
4	Abreißfestigkeit : Systemaufbau: Betondecke – HANV-Schicht Asphaltzwischen- und Asphaltdeckschicht	Prüfung bei 8 °C Prüfung bei 23 °C	2,3	0,9	1,4	≥ 0,7 N/mm <sup>2</sup>
		nach 1 h überarbeitet	1,8	0,7	0,8	
		nach 24 h überarbeitet	1,6	0,8	0,7	
		nach 24 h überarbeitet	1,1	0,6	0,5	
5	Biegezugfestigkeit an HANV Probekörpern, Durchbiegung, Bruchdehnung und E-Modul bei 0 °C und 23 °C Bruchverhalten bei 0 °C	Prüfung bei 0 °C Anlage der HANV	0,69	0,87	1,04	Wert ermitteln
		Durchbiegung [mm]	12,1	10,6	7,7	
		Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	spröd (10-15% im Gestein)	spröd (5-10% im Gestein)	spröd (5% im Gestein)	
		Bruchverhalten	2,06	3,65	3,53	
		Durchbiegung [mm]	7,1	3,2	2,4	
		Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0,59	0,30	0,31	
6	Wasserundurchlässigkeit HANV	In Anlehnung an DIN 12390, Teil 8	kein Druckverlust	kein Druckverlust	kein Druckverlust	kein Druckverlust [1bar/3 h]
7	Wasseraufnahme im Vakuum	TP Asphalt, Teil 82	0,4 Vol.-%	0,5 Vol.-%	0,4 Vol.-%	≤ 3,0 Vol.-%
8	Schubfestigkeit HANV System ohne Asphaltzwischen- und Asphaltdeckschicht, Schichtdicke HANV 4 cm	DIN EN 13653, Probekörperalterung nach TP-BEL-B Teil 1 [N/mm <sup>2</sup> ]	1,32	0,31	0,54	≥ 0,15 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.5 Weitergehende Untersuchungen zu den Eigenschaften der HANV-Schicht

Ziel dieses Vorhabens war es, Eigenschaften der HANV-Schicht zu beschreiben, die über die H HANV hinausgehen. Für diese weitergehenden Untersuchungen wurde die Komponente Verfüllbaustoff C nicht mehr variiert. Die Ergebnisse der an den mit Verfüllbaustoff C unter unterschiedlichen Verarbeitungsbedingungen verfüllten Asphaltträgergerüsten durchgeführten Untersuchungen werden nachfolgend vorgestellt. Mit den Untersuchungen sollte ein Nachweis darüber erbracht werden, ob bzw. inwieweit die Menge des Verfüllbaustoffes oder die Verarbeitung einen Einfluss auf die Schichteigenschaften nehmen. Eine Quantifizierung dieser Einflüsse wird im Abschnitt 5 vorgenommen.

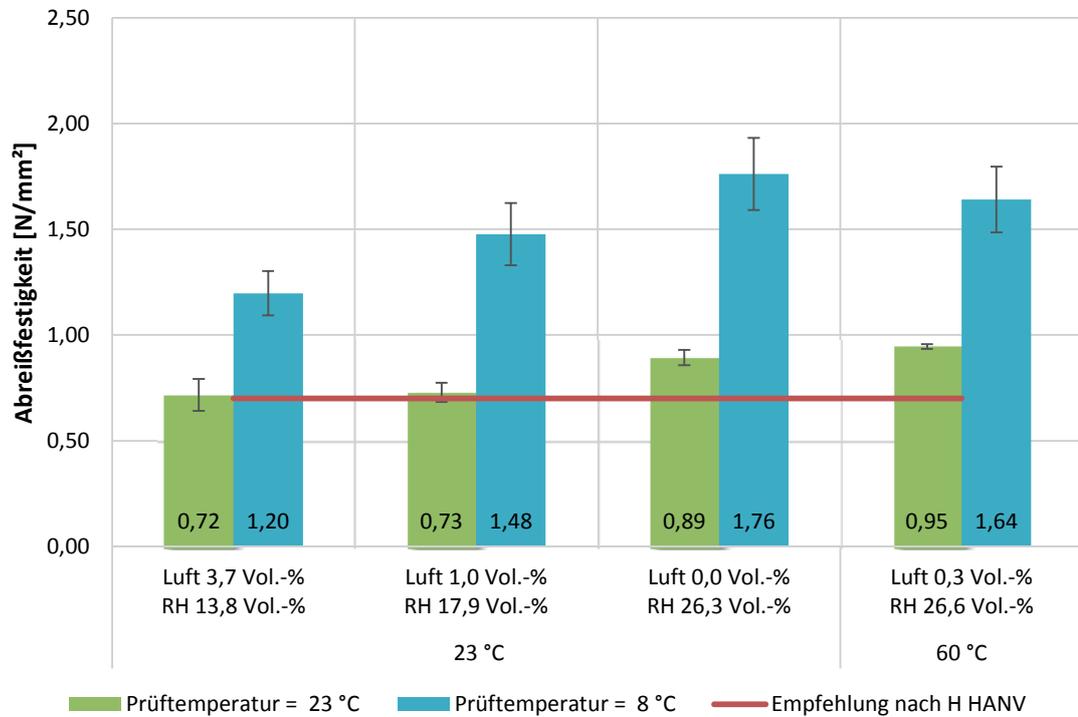
Nachfolgend sind den jeweiligen Untersuchungsergebnissen die volumetrischen Kennwerte (Anteil der Luft und des Verfüllbaustoffes in Vol.-%) der Prüfkörper zugeordnet, um einen ersten Eindruck über die Variationen zu vermitteln.



**Bild 34:** Biegeverhalten von Probekörpern mit unterschiedlichen Verfülltemperaturen und volumetrischen Kennwerten (Temperatur während des Verfüllens - Luft: Anteil der Luft in Vol.-%; RH: Anteil des Reaktionsharzes in Vol.-%; Luft + RH = Hohlraumgehalt des ATG)

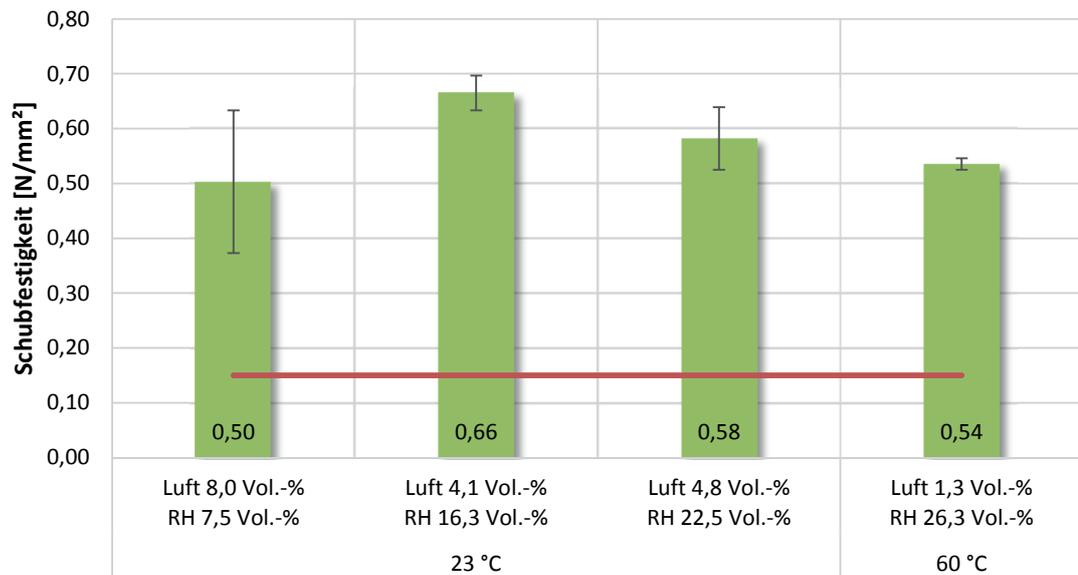
Zur Beurteilung des Kälteverhaltens wurde, in Anlehnung an die langjährigen Erfahrungen mit der Biegeprüfung an Gussasphalt in Berlin [22], der Quotient aus der Biegefestigkeit bei 23 °C und 0 °C berechnet. Dieser sollte für ein ausreichend flexibles Verhalten maximal 0,6 und die Durchbiegung bei 0 °C mindestens 0,3 mm betragen. Die Prüfung von Gussasphalt wurde bei einer Temperatur von 22 °C und 0 °C durchgeführt. Die empfohlenen Anforderungen werden von allen Varianten eingehalten. Bei den Varianten mit dem Verfüllbaustoff B und C ist erkennbar, dass diese ein flexibleres Verhalten im Vergleich zum Verfüllbaustoff A aufweisen. Mit

zunehmendem Hohlraumgehalt fällt die Durchbiegung zunächst und steigt dann bei nahezu konstanten Quotienten an.



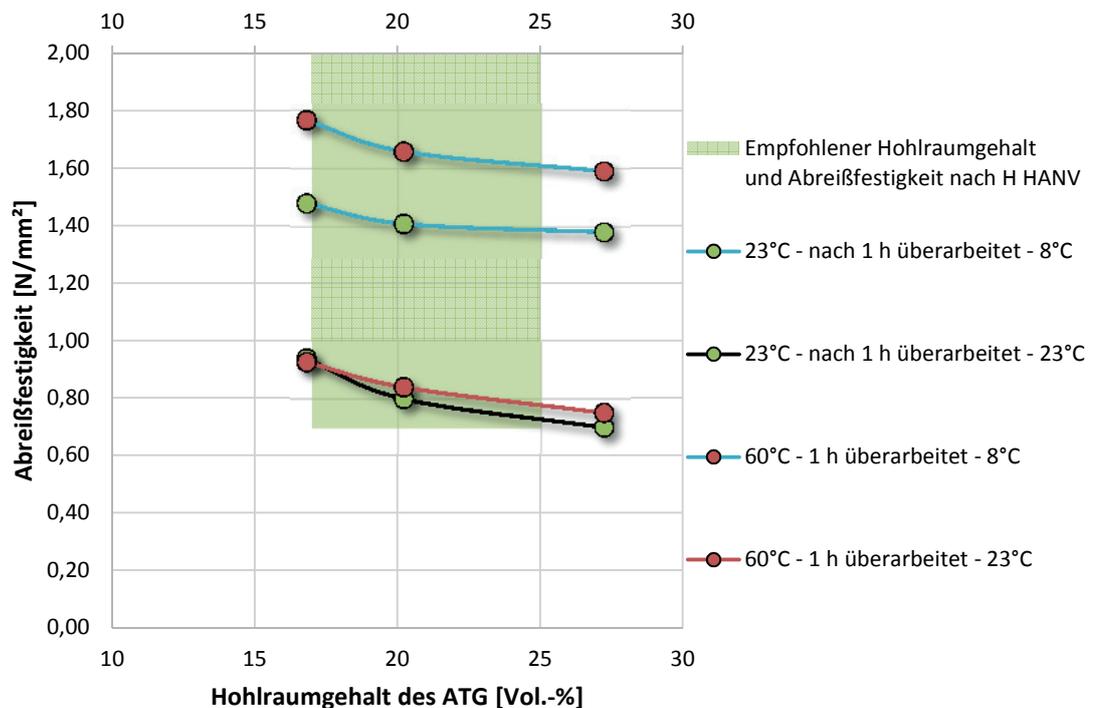
**Bild 35:** Abreißfestigkeit zur Betonunterlage (Prüftemperatur 8 °C und 23 °C) bei einer Temperatur während des Verfüllens von 23 °C und 60 °C bei unterschiedlichen volumetrischen Kennwerten (Luft: Anteil der Luft in Vol.-%; RH: Anteil des Reaktionsharzes in Vol.-%; Luft + RH = Hohlraumgehalt des ATG)

Die Abreißfestigkeit zur Betonunterlage steigt mit zunehmendem Hohlraumgehalt im Asphaltträgerüst zur Verfüllung bzw. dem Anteil an Verfüllbaustoff im verfüllten Prüfkörper. Dieser Anstieg wird bei einer Prüftemperatur von 8 °C deutlicher, als bei 23 °C. Eine höhere Verfülltemperatur hat keinen eindeutigen Einfluss auf die Ergebnisse. Unabhängig von den Randbedingungen wird die empfohlene Anforderung der H HANV von 0,7 N/mm<sup>2</sup> eingehalten.



**Bild 36:** Schubfestigkeiten nach Wärmealterung bei einer Temperatur während des Verfüllens von 23 °C und 60 °C bei unterschiedlichen Hohlraumgehalten (Luft: Anteil der Luft in Vol.-%; RH: Anteil des Reaktionsharzes in Vol.-%; Luft + RH = Hohlraumgehalt des ATG)

Die Schubfestigkeit nach Wärmealterung weist mit zunehmendem Hohlraumgehalt im Asphaltträgergerüst zur Verfüllung bzw. dem Anteil an Verfüllbaustoff im verfüllten Prüfkörper ein Maximum bei ca. 20 Vol.-% auf. Eine höhere Verfülltemperatur hat keinen quantifizierbaren Einfluss auf die Ergebnisse. Unabhängig von den Randbedingungen wird die empfohlene Anforderung der H HANV von 0,15 N/mm<sup>2</sup> eingehalten.

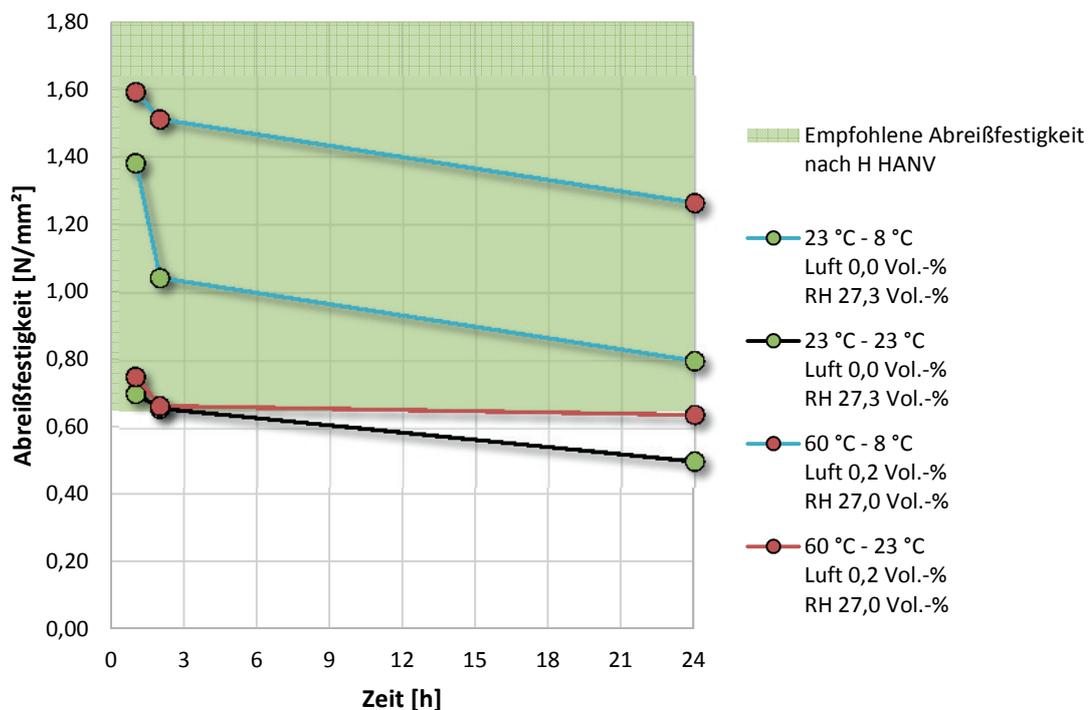


**Bild 37:** Abreibfestigkeit der geprüften Varianten nach 1 h Überarbeitung mit einer Asphaltzwichenschicht aus Walzasphalt in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt des Asphaltträgergerüsts (1. Temperatur: Temperatur des ATG beim Verfüllen –

*Zeitspanne zwischen dem Beginn des Verfüllvorganges und der Überarbeitung mit einer Asphaltzwischen­schicht – 2. Temperatur: Prüftemperatur der Abreißfestigkeit)*

Bei der Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen­schicht aus Walzasphalt kann festgehalten werden, dass von allen Varianten, unabhängig vom Hohlraumgehalt und den unterschiedlichen Randbedingungen beim Verfüllen und Prüfen, der empfohlene Anforderungswert der H HANV von 0,7 N/mm<sup>2</sup> eingehalten wird. Dies trifft auch auf die Varianten mit einem Hohlraumgehalt über dem empfohlenen Bereich der H HANV zu. Mit zunehmendem Hohlraumgehalt des ATG nimmt die Abreißfestigkeit ab. Ob dies direkt auf die Menge des Verfüllbaustoffes zurückgeführt werden kann, muss noch statistisch geprüft werden. Grund hierfür ist die unter Abschnitt 4.3.1 aufgeführte volumetrische Betrachtung der HANV-Schicht.

Die höhere Verfülltemperatur hat bei einer Prüftemperatur von 23 °C keinen eindeutigen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei einer geringeren Temperatur von 8 °C nimmt die Abreißfestigkeit bei einer höheren Verfülltemperatur zu.



**Bild 38:** Abreißfestigkeit der geprüften Variante mit einem Hohlraumgehalt von 27,2 Vol.-% nach variierenden Überarbeitungszeiten mit einer Asphaltzwischen­schicht aus Walzasphalt in Abhängigkeit zum Überarbeitungszeitpunkt (1. Temperatur: Temperatur des ATG beim Verfüllen – Hohlraumgehalt des ATG – 2. Temperatur: Prüftemperatur der Abreißfestigkeit)

An der Variante mit einem Hohlraumgehalt des Asphalttraggerü­stes von 27,2 Vol.-% wurde die Zeit bis zur Überarbeitung mit einer Asphaltzwischen­schicht aus Walzasphalt in drei Stufen variiert. Nach 2 Stunden Wartezeit bis zur Überarbeitung ist eine deutliche Abnahme der Abreißfestigkeit zu erkennen, welche mit zunehmender Aushärtungszeit des Verfüllbaustoffes noch weiter abnimmt. Bei einer Prüftemperatur von 23 °C können somit Abreißfestigkeiten ermittelt werden, welche unterhalb des Anforderungsniveaus der H HANV liegen können. Eine Temperatur des Asphalttraggerü­stes von 60 °C während des Verfüllvorganges führt bei niedrigen Prüftemperaturen zu einer höheren Abreißfestigkeit gegenüber einer Verfülltemperatur

von 23 °C. Weiterhin erscheint die höhere Verfülltemperatur den Einfluss auf die zeitabhängige Empfindlichkeit des Schichtenverbundes zu dämpfen.

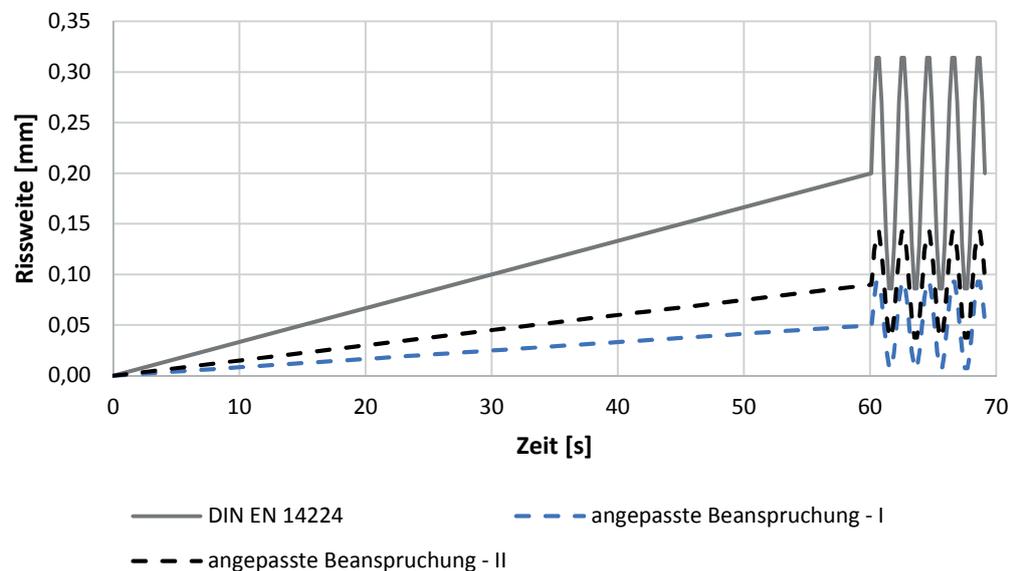
#### 4.3.6 Rissüberbrückung einer HANV-Schicht

Die Rissüberbrückung wurde beispielhaft an einer Variante geprüft. Die Durchführung erfolgte durch die KIWA Polymer Institut GmbH, welcher hierfür sechs Prüfkörper zur Verfügung gestellt wurden. Die Auswahl des Reaktionsharzes sowie die Festlegung der Bedingungen bei der Herstellung der Prüfkörper und der Prüfbedingungen erfolgte auf Grundlage der umfangreichen Erkenntnisse aus den Voruntersuchten.

##### Prüfbedingungen:

Aus vorangegangenen Arbeiten mit dem Reaktionsharz A war bekannt, dass eine mittlere Rissweite von 0,20 mm bzw. eine maximale Auslenkung auf 0,32 mm bei einer Prüftemperatur von -20 °C nicht von dem Abdichtungssystem aufgenommen werden können. Erst mit einer reduzierten Rissaufweitung von im Mittel 0,050 mm mit einer Auslenkung von bis zu 0,095 mm überstanden die Prüfkörper die Prüfung ohne zu versagen [30].

Bei den durchgeführten Untersuchungen sollte überprüft werden, ob bei Nutzung eines „viskoserem“ Reaktionsharzes die Belastungsanforderungen der DIN EN 14224 erfüllt werden können (graue Volllinie in Bild 39). Falls dies nicht der Fall ist, sollte in einem Tastversuch ermittelt werden, ob die angepasste Beanspruchung nach [30] erfüllt werden kann (Stufe I – blaue Strichlinie in Bild 39). Sofern diese Beanspruchung ohne Versagen des Prüfkörpers erreicht wird, sollte die Belastung auf eine nächst höhere Stufe erhöht werden. (Stufe II – schwarze Strichlinie in Bild 39).



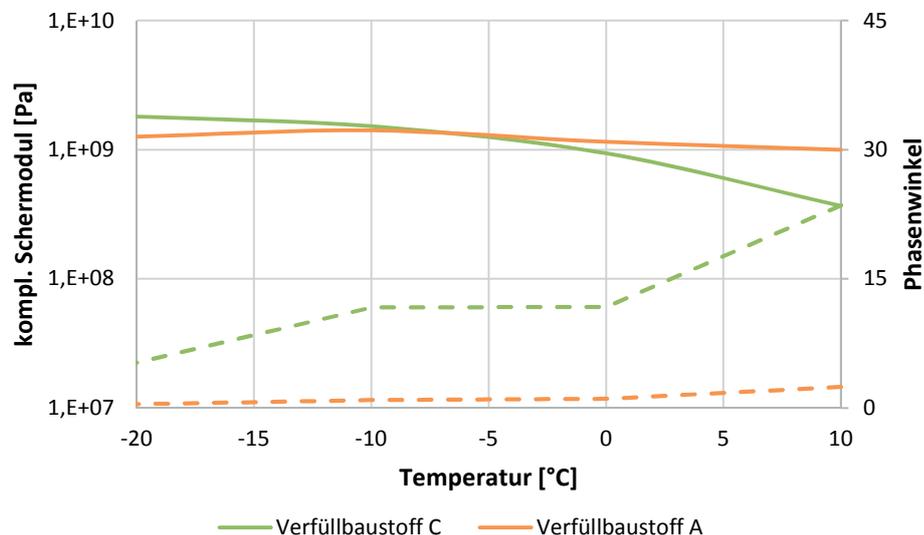
**Bild 39:** Beanspruchung der DIN EN 14224 und der angepasste Abstufungen bei 1 Hz inkl. statischer Aufweitung zum Anfang

**Tabelle 7:** Rissweiten der getesteten Beanspruchungsstufen

Beanspruchung nach	mittlere Rissweite [mm]	Amplitude [mm]	maximale Rissweite [mm]
DIN EN 14224	0,200	0,120	0,320
Stufe I	0,050	0,045	0,095
Stufe II	0,090	0,055	0,145

### Auswahl des Reaktionsharzes

Der Verfüllbaustoff A wurde in [30] bereits hinreichend hinsichtlich seiner Rissüberbrückungsfähigkeit beschrieben. Um einen Eindruck zu gewinnen, welche Auswirkungen die Reaktionsharze auf das Gesamtsystem bei der Rissüberbrückung nehmen, wurde für diese Versuche daher der Verfüllbaustoff C gewählt. Entsprechend der Isochronen im Bild 24 ist ersichtlich, dass der Verfüllbaustoff B und C bei einer Temperatur von  $-20\text{ °C}$  ein vergleichbares rheologisches Verhalten aufweisen. Gegenüber dem Verfüllbaustoff A ist bei sehr geringen Temperaturen eine höhere Steifigkeit festzuhalten. Die einwirkenden Kräfte werden jedoch gedämpfter abgetragen (höherer Phasenwinkel). Die Untersuchungen im Abschnitt 4.2.3 wurden jedoch bei einer Frequenz von  $1,59\text{ Hz}$  durchgeführt. Die Prüfung der Rissüberbrückungsfähigkeit wird jedoch bei einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$  durchgeführt. Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Belastungsfrequenz zu quantifizieren, wurden analog Abschnitt 4.2.3 Einzelmessungen bei  $10\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ ,  $-10\text{ °C}$  und  $-20\text{ °C}$  mit einer Belastungsfrequenz von  $1\text{ Hz}$  durchgeführt. Die Ergebnisse weisen die gleichen Relationen auf wie bei einer Prüffrequenz von  $1,59\text{ Hz}$ .



**Bild 40:** Isochronen der Reaktionsharze A und C nach einer Aushärtung von 1 Tag bei  $60\text{ °C}$  und  $50\%$  rel. Luftfeuchtigkeit und bis zum 7. Tag bei  $23\text{ °C}$  und  $50\%$  rel. Luftfeuchte bei einer Prüffrequenz von  $1\text{ Hz}$  (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)

### Herstellung der Prüfkörper

Vor dem Fluten des ATG wurden die Prüfkörper für 4 h bei 60 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % gelagert. Nach dem Verfüllen wurden alle Prüfkörper für einen weiteren Tag bei 60 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % und bis zum 7. Tag bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte gelagert. Im Anschluss wurden die Proben an den Nachunternehmer zur Prüfung übergeben.

Die Prüfberichte des Nachunternehmers sind der Anlage 4 beigefügt. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchung tabellarisch zusammengefasst.

**Tabelle 8:** Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Rissüberbrückungsfähigkeit bei -20 °C und 1 Hz

Verfüllbaustoff	Belastung [mm]	Prüfergebnis	Prüfung bestanden
A [30]	0,20 ±0,12	Kraftabfall / Riss bei statischer Aufweitung (Zeitpunkt 0 bis 60 s)	Nein
	0,050 ± 0,045	Wasserdicht nach 10.000 Zyklen	Ja
C	0,20 ±0,12	Kraftabfall / Riss bei statischer Aufweitung (Zeitpunkt 0 bis 60 s)	Nein
	0,050 ± 0,045	Wasserdicht nach 10.000 Zyklen	Ja
	0,090 ± 0,055	Kraftabfall / Riss bei statischer Aufweitung (Zeitpunkt 0 bis 60 s)	Nein

Auch das bei hohen Temperaturen weichere Reaktionsharz hat nicht die Fähigkeit Risse bis 0,32 mm zu überbrücken. Die angepasste Belastung mit einer Rissaufweitung von bis zu ca. 0,10 mm wird vom Verfüllbaustoff C, sowie vom Verfüllbaustoff A erfüllt. Aufgrund der viskoserer Lastabtragung war eine höhere Rissaufweitung denkbar. Daher wurde mit dem Verfüllbaustoff C eine Rissweite von maximal ca. 0,15 mm anvisiert. Es konnte jedoch beobachtet werden, dass bereits bei statischer Rissaufweitung innerhalb der ersten Minute ein Versagen eintritt.

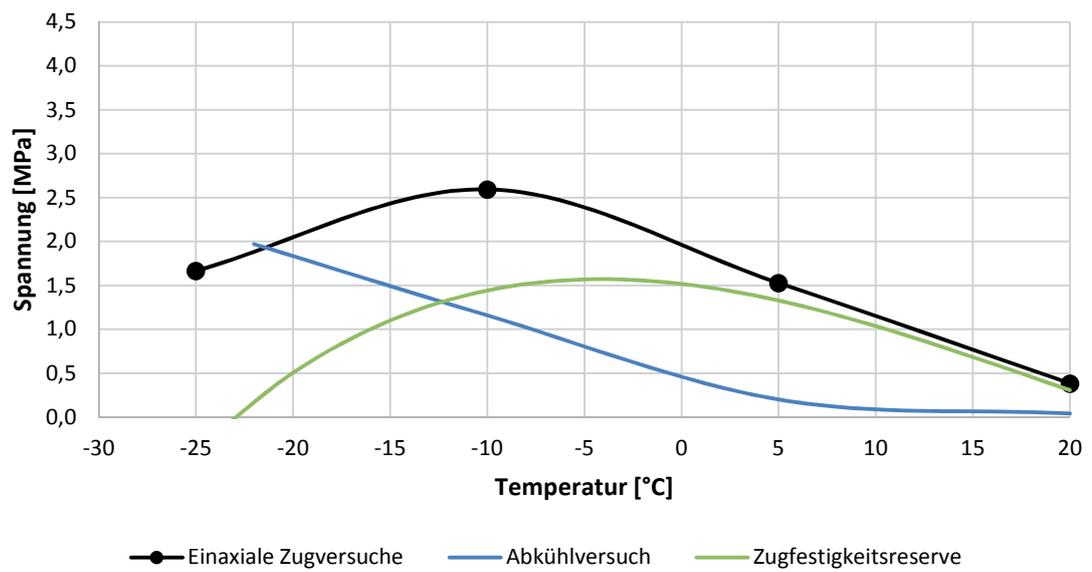
Es kann festgehalten werden, dass eine höheres viskoseres Abtragsverhalten in Kombination mit einer höheren Steifigkeit nicht ausreicht, um eine optimierte Rissüberbrückungsfähigkeit zu erreichen. Es wird abgeschätzt, dass mit der Reduzierung der Steifigkeit ein besseres Ergebnis erzielt werden kann. Aufgrund der einheitlichen Versagensart während der statischen Rissaufweitung, kann ein Defizit in den Relaxationseigenschaften der Reaktionsharze festgestellt werden. Zur Verbesserung der rissüberbrückenden Eigenschaften von HANV-Dichtungsschichten sind weitere Untersuchungen mit optimierten oder alternativen Verfüllbaustoffen nötig.

#### 4.3.7 Abkühlversuch und Zugfestigkeitsreserven

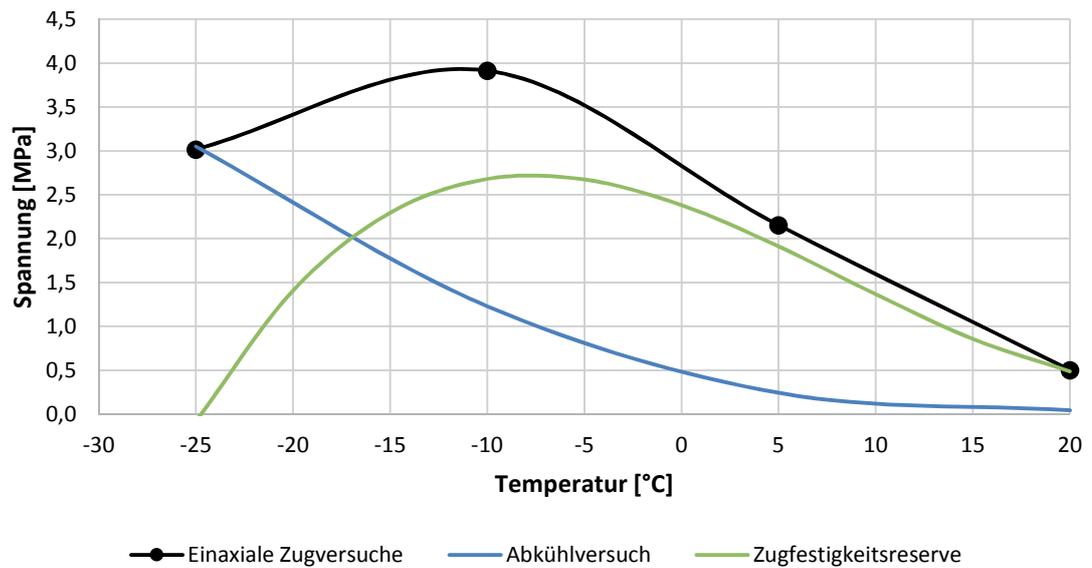
Zur Prüfung der Tieftemperatureigenschaften einer HANV-Schicht wurden Versuche mit den folgenden beiden Varianten durchgeführt:

- 27,2 Vol.-% Hohlraumgehalt, 4 cm Schichtdicke, Verfülltemperatur 23 °C
- 16,8 Vol.-% Hohlraumgehalt, 4 cm Schichtdicke, Verfülltemperatur 23 °C

Die Untersuchungen erfolgten entsprechend der TP Asphalt- StB Teil 46 A [19]. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden.



**Bild 41:** Zug-, Abkühlversuch und resultierende Zugfestigkeitsreserve der Variante mit einem Hohlraumgehalt am ATG V von 16,8 Vol.-%



**Bild 42:** Zug-, Abkühlversuch und resultierende Zugfestigkeitsreserve der Variante mit einem Hohlraumgehalt am ATG V von 26,3 Vol.-%

**Tabelle 9:** Zusammenfassung der Abkühl- und Zugfestigkeitsversuche

Kennwert	Einheit	Hohlraumgehalt des ATG 16,6 Vol.-%	Hohlraumgehalt des ATG 26,3 Vol.-%
Anteil der Luft	Vol.-%	8,3	5,7
Anteil des Verfüllbaustoffes	Vol.-%	8,3	20,6
Querschnitt	mm	40 x 40	40 x 40
Bruchtemperatur $T_F$	°C	-22,0	-26,4
Kryogene Spannung $\sigma_{cry}(T)$	N/mm <sup>2</sup>	1,970	3,144
Zugfestigkeitsreserve	°C	-4,1	-7,7
	N/mm <sup>2</sup>	1,6	2,7

Die Prüfkörper der Variante mit geringerem Anteil am Verfüllbaustoff weist eine um 4,4 Kelvin höhere Bruchtemperatur auf, als die mit höherem Anteil an Verfüllbaustoff. Weiterhin steigt die Temperatur der Zugfestigkeitsreserve um 3,6 Kelvin und die aufnehmbare mechanogene Spannung fällt um 1,1 MPa. Ob diese Effekte nur auf den höheren Anteil an Verfüllbaustoff C zurückzuführen sind, kann aufgrund der unterschiedlichen Ausfüllungsgrade und damit einhergehenden resultierenden Hohlraumgehalte nicht ausgesagt werden. Insgesamt weisen die Bruchtemperaturen auf ein günstiges Tieftemperaturverhalten hin.

Gegenüber einem ATG V ohne Verfüllung (vgl. Abschnitt 4.1.3) sind bei der Variante mit höherem Anteil an Verfüllbaustoff keine signifikanten Veränderungen in der Bruchtemperatur erkennbar. Die Bruchspannung steigt um ca. 1,1 MPa an.

#### 4.3.8 Resümee

Anhand der Untersuchungen an der HANV-Schicht können bisher die folgenden Aussagen getroffen werden:

- Der Volumenanteil des Reaktionsharzes im Gesamtsystem hat einen Einfluss auf die Kennwerte der Schicht
- Die Eigenschaften der Verfüllbaustoffe nehmen Einfluss auf die HANV-Schicht.
- Die Auswirkungen sind abhängig vom Hohlraumangebot des ATG V, dem Grad der Hohlräumeausfüllung, der Prüftemperatur und der Zeit. Zur Validierung der Ergebnisse sollten die Reaktionsharze bei der Probenvorbereitung äquivalenten Temperaturbeanspruchungen ausgesetzt und dann die Gebrauchseigenschaften untersucht werden.
- Der Grad der Hohlräumeausfüllung kann über höhere Temperaturen des ATG V beim Verfüllvorgang optimiert werden.
- Größere Schichtdicken führen zu einer schlechteren Verfüllbarkeit des Asphaltträgergerüsts und damit zu einem höheren Resthohlraumgehalt in der Schicht.
- Für eine verbesserte Rissüberbrückung ist ein viskoseres Verhalten nicht zielführend. Hierfür wird ein flexibilisiertes Reaktionsharz mit geringer Steifigkeit bei niedrigen Temperaturen benötigt, welches bei hohen Gebrauchstemperaturen zugunsten des Verbundes ebenfalls eine hohe Steifigkeit aufweist.

Zur Bestätigung dieser Aussagen wurden weitergehende statistische Betrachtungen im nachfolgenden Abschnitt durchgeführt, die neben dem Hohlraumgehalt des ATG V, den Anteil des Verfüllbaustoffes und ggf. den Resthohlraumgehalt der HANV-Schicht berücksichtigen.

## 5 Quantifizierung der Einflüsse auf die Eigenschaften der Schicht

### 5.1 Allgemeine Betrachtungen und Vorgehensweise

Zur Quantifizierung unterschiedlicher Einflüsse resultierend aus den Baustoffen und Baustoffgemischen der Schicht auf die Kennwerte des Gesamtsystems wurden multiple Regressionsanalysen durchgeführt. Dies sollte den im Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Sachverhalt kompensieren und eine Aussage über die Wichtung der Einflüsse zulassen.

Vor den statistischen Betrachtungen wurde eingeschätzt, welche unabhängigen Variablen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse nehmen können. Diesbezüglich können die Untersuchungen in zwei Kategorien unterteilt werden.

1. Kategorie:

Einflüsse durch reagierende bzw. noch nicht ausgehärtete Reaktionsharze während der Verarbeitung.

Die Kategorie berücksichtigt alle Einflüsse auf den Ausfüllungsgrad des Asphalttraggerüstes mit dem Reaktionsharz.

Es wurde bei der Betrachtung davon ausgegangen, dass der Hohlraumgehalt des Asphalttraggerüstes und die Schichtdicke einen steuerbaren Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Durchflussmenge ist bei den verwendeten Platten abhängig vom Hohlraumgehalt (vgl. Bild 6) und wurde daher nicht berücksichtigt. Indirekt kann bei dem vorliegenden Asphalttraggerüst eine Aussage zur Durchflussmenge über diesen Zusammenhang erfolgen. Als weiteren Aspekt wurde das anfängliche konstante Niveau des komplexen Schermoduls aus der Aushärtung bei 23 °C und 60 °C herangezogen (vgl. Bild 9 und Bild 10). Dies weist vergleichbare Tendenzen zur temperaturabhängigen Viskosität auf und kann folglich als Alternative zur Beschreibung der Eigenschaften der Reaktionsharze herangezogen werden. Die Verfülltemperatur steht dann in Zusammenhang mit dem komplexen Schermodul. Der Zusammenhang ist abhängig vom verwendeten Verfüllbaustoff und dessen Vernetzungsreaktion bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Temperatur des Asphalttraggerüstes wurde aufgrund dieses Zusammenhanges zwischen den Variablen bei der Betrachtung nicht direkt berücksichtigt.

2. Kategorie:

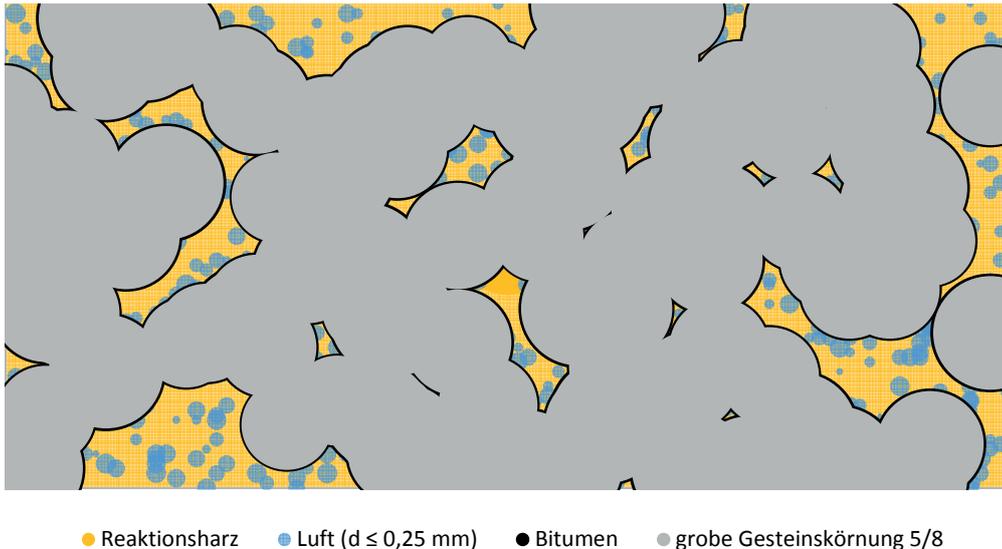
Einflüsse auf die HANV-Schicht während der Nutzung.

Alle Untersuchungen am Gesamtsystem, welche die Gebrauchseigenschaften (Verbund zwischen den Schichten, Tieftemperaturverhalten, Tragfähigkeit) beschreiben werden in dieser Untersuchung zusammengefasst.

Der Charakter der angewandten Prüfungen zielt auf Schwächezonen des Systems bei unterschiedlichen Temperaturen. Mit den Abreißfestigkeiten wird zum Beispiel primär durch den untersuchten Aufbau der Verbund an der Grenze des HANV-Systems zu benachbarten Schichten untersucht. Dieser hängt auch von der Beschaffenheit und Zusammensetzung der benachbarten Schichten ab. Durch die gleichbleibenden Laborbedingungen können diese Einflüsse als konstant angenommen werden und werden aus den Betrachtungen ausgeschlossen. Bei Betrachtungen von Wechselwirkungen an der Schichtgrenze wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die volumetrischen Kennwerte der Schicht als charakterisierend für die gesamte HANV-Schicht sind. Weiterhin ist davon auszugehen, dass während der Verbundprüfung die Schwächezone auch innerhalb der HANV-Schicht liegen kann (kohäsives Versagen). Soweit das erforderliche Niveau der Abreißfestigkeit nicht unterschritten wird, ist dies auch keine negative Eigenschaft der Schicht bzw. des Verbundes zur benachbarten Schicht.

Durch die Prüfungen werden zumeist Zugkräfte bis zum Versagen durch die Schichten geleitet. Bei Betrachtung eines Querschnittshorizontes (vgl. Bild 43) in

der HANV-Schicht wurden dementsprechend alle Kennwerte in die Betrachtung aufgenommen, welche die Spannungen durch Reduzierungen des Querschnittes erhöhen könnten. Dies kann über die volumetrischen Kennwerte wie Anteil der Luft und des Reaktionsharzes beschrieben werden. Das Gesteinsvolumen nimmt in der Theorie keinen Einfluss, da die Gesteinskörnung nicht in der Lage ist die Zugkräfte aufzunehmen. Das bitumenhaltige Bindemittel umhüllt die Gesteinskörnung und nimmt im Querschnitt theoretisch einen sehr geringen Flächenanteil ein (vgl. Bild 43). Weiterhin kann mit dem rheologischen Verhalten des Reaktionsharzes das temperaturabhängige Verhalten der Verfüllbaustoffe beschrieben werden.



**Bild 43:** Idealisierte Querschnittsskizze durch eine HANV-Schicht mit zufälliger Verteilung der Baustoffe und Baustoffgemische ( $H_{\text{bit}} = 27 \text{ Vol.-%}$ , Ausfüllungsgrad des Reaktionsharzes = 95 %)

Die Ausnahme stellt die Ermittlung der Biegezugfestigkeit dar, welche im Prüfkörper zu einer Druck- und Biegezone führt. Hier muss das Gesteins- und Bindemittelvolumen mit berücksichtigt werden.

Das eingesetzte Bindemittel des großtechnisch hergestellten Asphalttraggerüstes war in jeder Mischung gleich. Somit konnte der Einfluss als Konstante mit aufgenommen werden.

Die Temperatur wurde indirekt mit berücksichtigt, indem die Eigenschaften des Verfüllbaustoffes äquivalent zur Prüftemperatur und den Erhärtungsbedingungen verwendet wurden. Ähnlich wurde der Zeitpunkt der Überarbeitung mit aufgenommen. Dieses Vorgehen sollte eine Unabhängigkeit von der Prüftemperatur und der Zeit gewährleisten.

Zur Beurteilung des Ergebnisses der multiplen Regressionsanalyse wurden Sensibilitätsanalysen über Fallbeispiele berechnet, welche eine Auskunft über die Veränderung des Kennwertes durch veränderte Ausgangseigenschaften des Asphalttraggerüstes, den Verfüllprozess oder die Eigenschaften des Verfüllbaustoffes geben sollen. Diese sollen nur eine tendenzielle Aussage ermöglichen und keine absoluten Werte wiedergeben. Daher wurden die Ergebnisse zum größten Kennwert einer Betrachtung normiert. Bei den Betrachtungen wurden für die Fallbeispiele bestimmte Parameter als Konstante angesetzt. Das Niveau der Konstanten entspricht nach bisherigen Erfahrungen dem durchschnittlichen Niveau der jeweiligen Eigenschaft.

Die zugrunde liegenden Daten sind der Ergebniszusammenfassung in Anlage 1 beigelegt. Aufgrund zu weniger Datensätze war es nicht möglich die Einflüsse auf den Schubverbund zu quantifizieren.

## 5.2 Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz

Zur Sicherstellung der abdichtenden Wirkung der HANV-Schicht wird nach Tabelle 4 der HANV die Forderung erhoben, dass nach einer Verfüllung bei 12 °C und 60 °C keine kommunizierenden Hohlräume in der Schicht vorhanden sein dürfen. Neben Undichtigkeiten können unzureichend ausgefüllte Asphaltträgerüste Schwächezonen durch Fehlstellen im Querschnitt erzeugen, die zu kohäsivem Versagen führen könnten. Bei den im Labor hergestellten Platten konnten ausreichend Daten gesammelt werden, um den Einfluss auf den Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz zu quantifizieren.

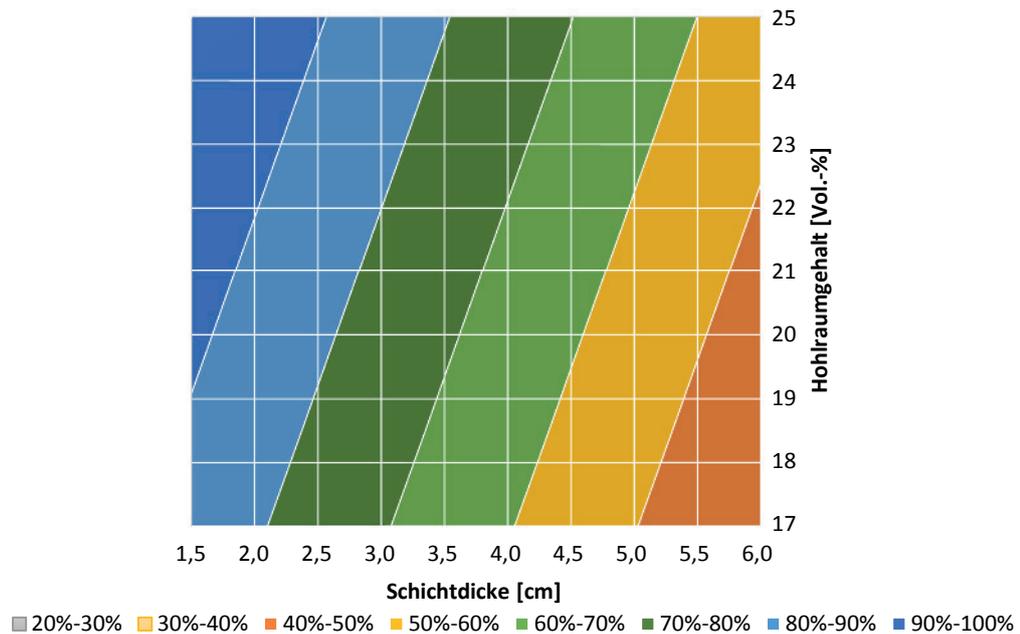
Nachfolgend sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse zusammengefasst.

**Tabelle 10:** Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse  
– Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz

These: Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz = $S+a \cdot x_a+b \cdot x_b+c \cdot x_c$			
Koeffizienten			Adjustiertes Bestimmtheitsmaß [%]
Schnittpunkt (S)		1,3985	84,2
a	Hohlraumgehalt des ATG V [Vol.-%]	0,0185	
b	Schichtdicke [cm]	-0,1023	
c	kompl. Schermodul [Pa]	-0,0077	

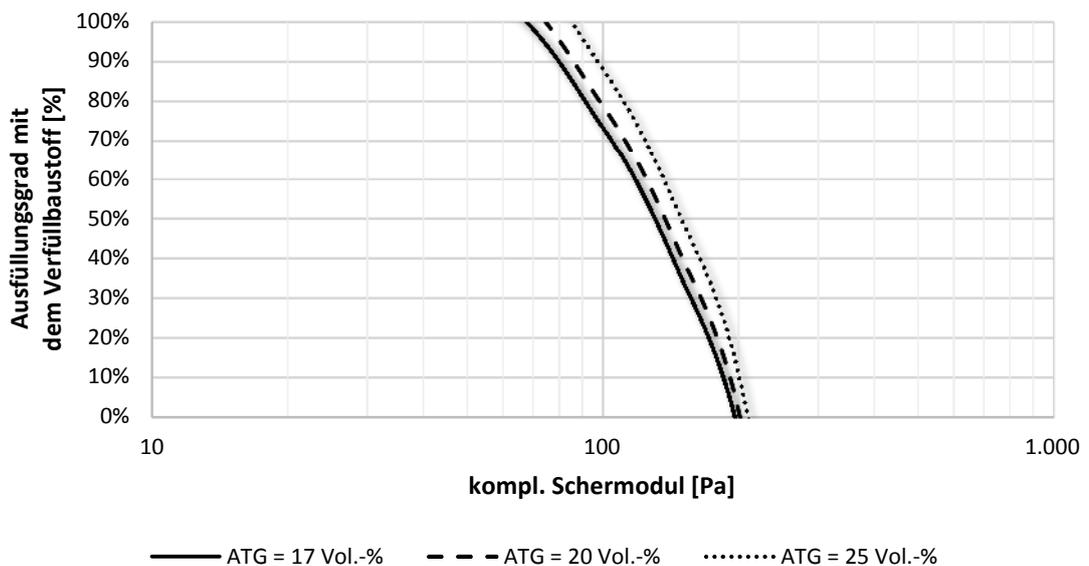
Mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß<sup>2</sup> von ca. 84 % kann von einem guten Zusammenhang ausgegangen werden. Anhand der Koeffizienten können folgende Aussagen getroffen werden. Ein hoher Hohlraumgehalt begünstigt den Ausfüllungsgrad. Mit zunehmender Schichtdicke und Steifigkeit nimmt der Ausfüllungsgrad ab. Das visko-elastische Verhalten des Reaktionsharzes bleibt bei der Betrachtung unberücksichtigt und konnte bei den vorliegenden Ergebnissen als konstant mit einem ideal viskosen Verhalten angenommen werden. Nachfolgend sind die Ergebnisse einer durchgeführten Sensibilitätsanalyse grafisch aufbereitet dargestellt.

<sup>2</sup> Zur Beurteilung der Güte der Regression wird ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß herangezogen. Diesem liegt das klassische Bestimmtheitsmaß zugrunde, welches durch die Anzahl der Koeffizienten korrigiert wurde und folglich die Anzahl der Ausgangsvariablen mit berücksichtigt.



**Bild 44:** Einfluss des Hohlraumgehaltes und der Schichtdicke des Asphaltträgerüstes auf den Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz (bei einem kompl. Schermodul von 90 Pa)

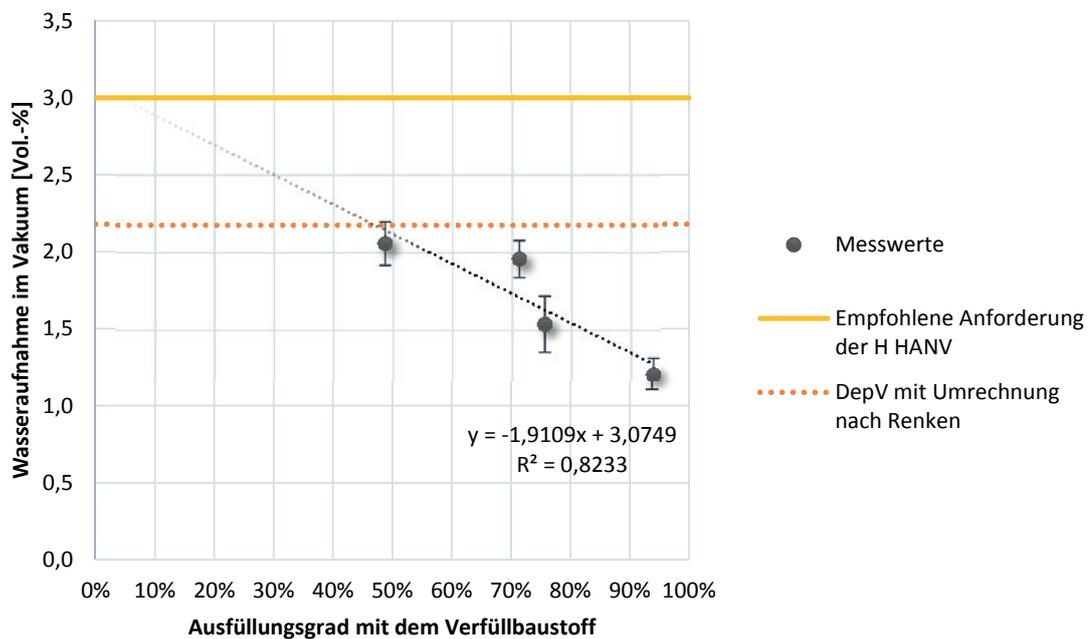
Bei der dargestellten Fallbetrachtung in Bild 44 wird innerhalb der zulässigen Spannweite des Hohlraumgehaltes der Ausfüllungsgrad unabhängig von der Schichtdicke um ca. 15 % mit abnehmendem Hohlraumgehalt reduziert. Mit dem HANV-System ist es möglich Unebenheiten aus der Unterlage auszugleichen. Dies kann, abweichend zur empfohlenen Schichtdicke zwischen 2,0 cm bis 2,5 cm, zu einer lokalen Erhöhung der Schichtdicke führen. Diese Erhöhung hat einen Einfluss auf den Ausfüllungsgrad des Asphaltträgerüstes. Pauschal kann im vorliegenden Fall die Aussage getroffen werden, dass je Zentimeter Schichtdicke eine Abnahme des Ausfüllungsgrades von 10 % zu erwarten ist.



**Bild 45:** Einfluss des komplexen Schermoduls auf den Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz (bei einer Schichtdicke 2 cm)

Bei einer Schichtdicke von 2 cm ist unabhängig vom Hohlraumgehalt des Asphalttraggerüstes ein komplexer Schermodul von unter 100 Pa notwendig, um einen Ausfüllungsgrad von 100 % gewährleisten zu können. Mit abnehmender Temperatur steigt die Steifigkeit der Reaktionsharze und führt zu einer exponentiellen Abnahme des Ausfüllungsgrades. Bei den durchgeführten Untersuchungen an den Reaktionsharzen und der Verfüllbarkeit, kann nur die Aussage getroffen werden, dass eine Mindesttemperatur von 20 °C im Asphalttraggerüst und dem Verfüllbaustoff vorliegen muss.

Um den Einfluss des Ausfüllungsgrades auf die Durchlässigkeit der Schicht zu quantifizieren, wurde die Wasseraufnahme unter Vakuum an Resten von jeweils zwei Prüfkörpern der Biegefestigkeit mit dem Verfüllbaustoff C (vgl. Abschnitt 4.3.4 - Tabelle 6) verwendet.



**Bild 46:** Relation zwischen dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff und der Wasseraufnahme im Vakuum

Mit zunehmendem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff nimmt die Wasseraufnahme im Vakuum ab. Die H HANV empfiehlt in der Grundprüfung eine maximale Wasseraufnahme von 3,0 Vol.-%. Aus der Deponieverordnung lässt sich ein maximales Niveau für den Hohlraumgehalt von 3,0 Vol.-% für Dichtungsschichten aus Asphalt entnehmen, wenn der Hohlraumgehalt über die Raum- und Rohdichte berechnet wurde [25]. Nach Renken entspricht ein berechneter Hohlraumgehalt von 3,0 Vol.-% in etwa einem Niveau von 2,2 Vol.-% bei der Wasseraufnahme unter Vakuum [26]. Diese beiden Erfahrungswerte wurden dem Bild 46 beigefügt.

Entsprechend der H HANV wäre dann beim vorliegenden Fallbeispiel ein Ausfüllungsgrad von ca. 10 % mit dem Verfüllbaustoff als noch ausreichend anzusehen, wenn die Daten extrapoliert werden. Unter Berücksichtigung des angepassten Anforderungswertes der Deponieverordnung wären mindestens 50 % erforderlich, um die eine dichte Abdichtungsschicht zu gewährleisten. Nach Ansicht der Verfasser wäre unter Berücksichtigung der Prüfeempfindlichkeit ein Mindestausfüllungsgrad von ca. 75 % mit dem Verfüllbaustoff, einhergehend mit einer Wasseraufnahme von maximal 2 Vol.-%, zu fordern.

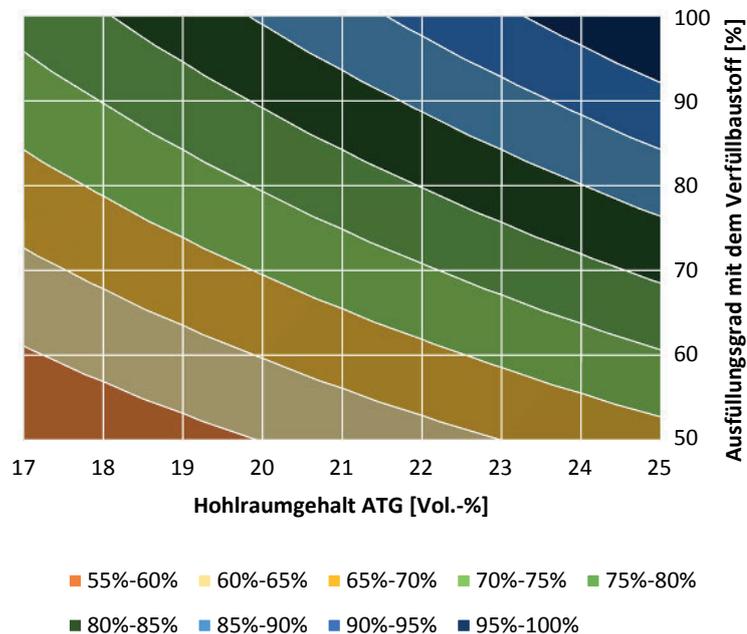
### 5.3 Haftverbund zur Betonunterlage

Der Verbund zur Betonunterlage gewährleistet eine Übertragung der Schubkräfte und nimmt Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Schicht. Mit den Untersuchungen sollte geklärt werden, wie sensibel der Verbund von bestimmten Kennwerten abhängig ist.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse tabellarisch und graphisch zusammengefasst. Sie werden anschließend erläutert.

**Tabelle 11:** Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse  
– Abreißfestigkeit zur Betonunterlage

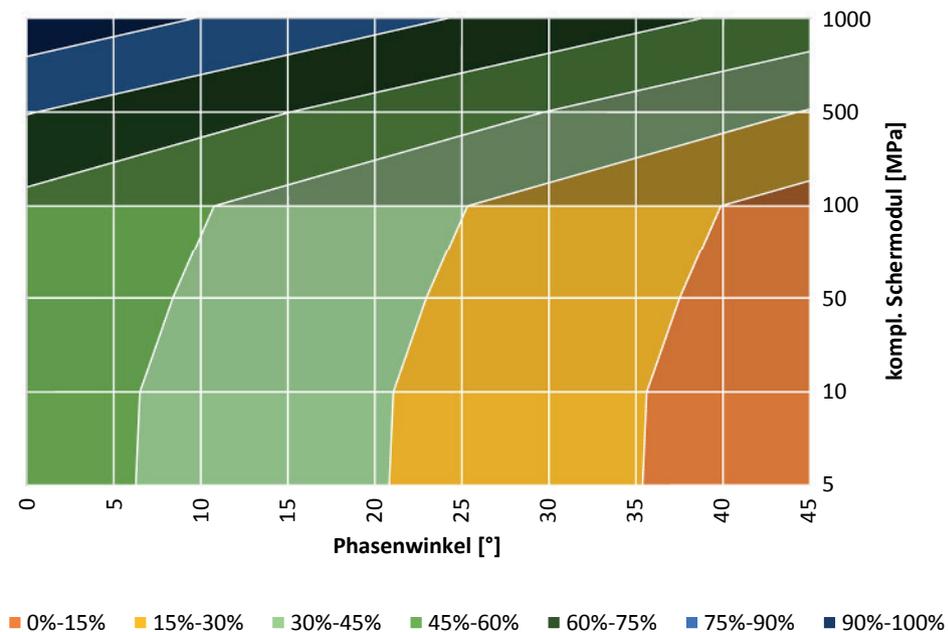
These: <b>Abreißfestigkeit zur Betonunterlage</b> = $S+a \cdot X_a+b \cdot X_b+c \cdot X_c+d \cdot X_d$		
Koeffizienten		Adjustiertes Bestimmtheitsmaß [%]
Schnittpunkt (S)		0,8165
a	Hohlraumgehalt des ATG V [Vol.-%]	0,0042
b	Ausfüllungsgrad [%]	0,0340
c	kompl. Schermodul [MPa]	0,0014
d	Phasenwinkel [°]	-0,0301
		90,7



**Bild 47:** Einfluss des Asphalttraggerüstes und dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff auf die Abreißfestigkeit zur Betonunterlage (100 % = 1,2 MPa, 55 % = 0,7 MPa; Annahme: kompl. Schermodul von 150 MPa und ein Phasenwinkel von 23,5°)

Entsprechend der Sensibilitätsanalyse nimmt mit zunehmenden Anteil an Verfüllbaustoff die Abreißfestigkeit zur Betonunterlage zu. Für die Praxis ist folglich ein hoher Ausfüllungsgrad und Hohlraumgehalt des ATG für eine hohe Abreißfestigkeit anzustreben. Die Veränderung von ca. 0,5 MPa ist im Sinne der Prozesssicherheit für die Praxis als ausreichend anzusehen. Wenn ein Asphalttraggerüst mit 20 Vol.-% und

eine vollständige Verfüllung (Anteil der Luft = 0 Vol.-%) bei veränderlichen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes angenommen werden, dann ist von dem Fallbeispiel in Bild 48 auszugehen. Dementsprechend wäre ein Niveau von über 30 % erforderlich, um den Anforderungswert von 0,7 MPa entsprechend der H HANV einzuhalten. Tendenziell ist mit zunehmendem elastischen Verhalten und steigendem komplexen Schermodul eine Zunahme der Abreißfestigkeit erkennbar. Viskoses Verhalten wirkt sich eher negativ auf die Abreißfestigkeit aus.



**Bild 48:** Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Abreißfestigkeit zur Betonunterlage (100 % = 2,9 MPa, 5 % = 0,2 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und ein Anteil der Luft von 0 Vol.-%)

In den vorliegenden Fallbeispielen und auch bei Änderung der Ausgangsparameter (Hohlraumgehalt, Verfüllungsgrad, kompl. Schermodul und Phasenwinkel) ist zu erkennen, dass die Eigenschaften des Verfüllbaustoffes den Haftverbund zur Betonunterlage maßgeblich gegenüber den Eigenschaften aus dem ATG beeinflussen.

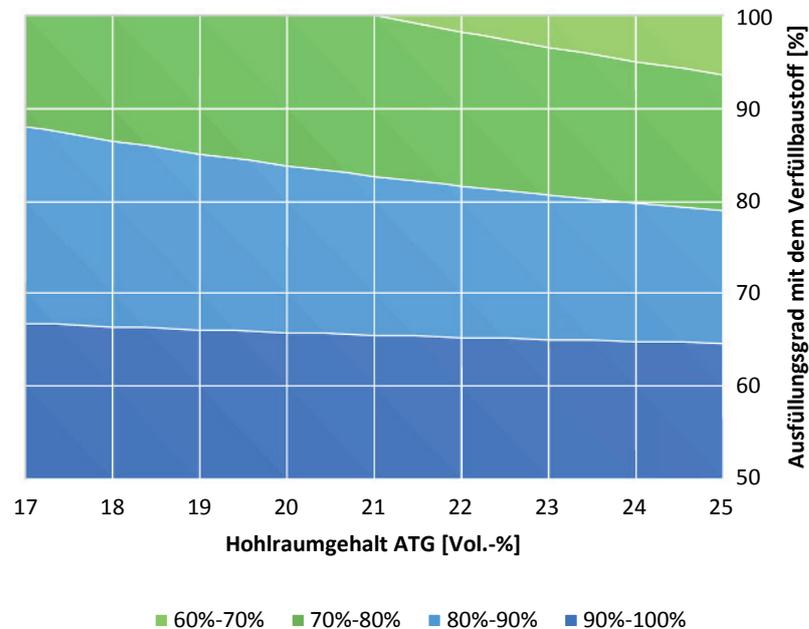
#### 5.4 Haftverbund zur Asphaltzwischen-/-deckschicht

Der Verbund zur Asphaltzwischen-/-deckschicht weist hinsichtlich der beteiligten Wirkungsmechanismen und Einflussgrößen mit der Abreißfestigkeit zur Betonunterlage eine deutliche Äquivalenz auf. Als weitere Kenngröße ist noch der Verfüllbaustoff während bzw. kurz vor der Überarbeitung anzusehen. Aus eigenen Erfahrungen und Ergebnissen der Grundprüfungen an unterschiedlichen Verfüllbaustoffen nimmt der Vernetzungsgrad bei der Überarbeitung einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Abreißfestigkeit.

Anhand der Voruntersuchungen im DSR ist bekannt, dass durch schnell ansteigende Temperaturen die Reaktionsgeschwindigkeit exponentiell ansteigt (vgl. Abschnitt 4.2.2) und innerhalb von Minuten unabhängig von der Ausgangstemperatur und vorherigen Erhärtungszeit die Vernetzungsreaktion abgeschlossen erscheint (vgl. Bild 17 bis Bild 19). Für die Betrachtung zum Einfluss auf Abreißfestigkeit wurden daher die Kennwerte kurz vor der Überarbeitung angesetzt..

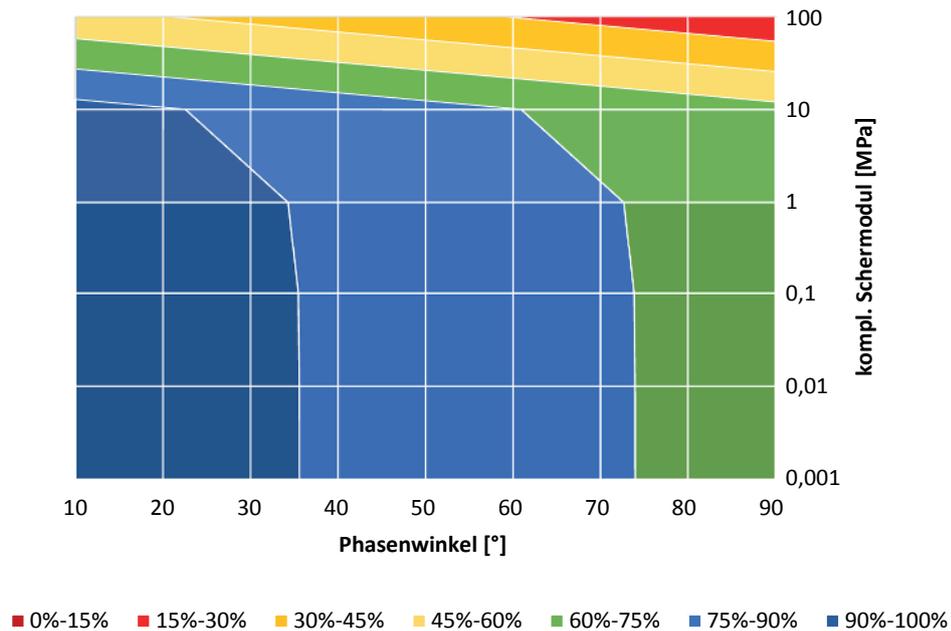
**Tabelle 12:** Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse  
– Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-/-deckschicht

These: <b>Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-/-deckschicht</b> $= S+a \cdot X_a+b \cdot X_b+c \cdot X_c+d \cdot X_d+e \cdot X_e+f \cdot X_f$		
Koeffizienten		Adjustiertes Bestimmtheitsmaß [%]
Schnittpunkt (S)		4,1688
a	Volumen der Luft [Vol.-%]	0,0292
b	Volumen des Verfüllbaustoffes [Vol.-%]	-0,0195
c	kompl. Schermodul (ausgehärtet) [MPa]	-0,0015
d	Phasenwinkel (ausgehärtet) [°]	-0,0914
e	kompl. Schermodul (frisch) [MPa]	-0,0069
f	Phasenwinkel (frisch) [°]	-0,0053
		90,0



**Bild 49:** Einfluss des Asphalttraggerüsts und dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff auf die Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-/-deckschicht (100 % = 1,4 MPa, 75 % = 1,1 MPa; Annahme: kompl. Schermodul von 150 MPa und ein Phasenwinkel von 23,5° im ausgehärteten Zustand, kompl. Schermodul von 0,2 MPa und ein Phasenwinkel von 28,5° kurz vor der Überarbeitung)

Entsprechend der Sensibilitätsanalyse nimmt mit höherem Ausfüllungsgrad und abnehmendem Hohlraumgehalt die Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-/-deckschicht zu. Zusammengefasst kann die Aussage getroffen werden, dass bei Berücksichtigung der empfohlenen Spannweite des Hohlraumgehaltes nach [6] keine signifikanten Änderungen bei einer Veränderung der Abreißfestigkeit von im Mittel 0,06 MPa einhergeht. Eine Spannweite des Ausfüllungsgrades von 50 % führt zu einer absoluten Veränderung von im Mittel 0,5 MPa.



**Bild 50:** Einfluss des Vernetzungsgrades des Verfüllbaustoffes auf die Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-/deckschicht (100 % = 1,4 MPa, 25 % = 0,2 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Anteil der Luft von 0 Vol.-%, kompl. Schermodul von 150 MPa und einem Phasenwinkel von 23,5° im ausgehärteten Zustand)

Zur Verbesserung des Verbundes zwischen der HANV-Schicht und einer darüber aufgetragenen Asphaltdeckenschicht ist ein geringes komplexes Schermodul, einhergehend mit einem elastischen Abtrag der Kräfte (geringer Phasenwinkel) anzustreben. Bei den untersuchten Verfüllbaustoffen nimmt das elastische Verhalten mit zunehmender Vernetzungsreaktion und höherem komplexen Schermodul zu. Dieser Widerspruch zwischen der Reaktionskinetik und dem Ergebnis des Fallbeispiels kann wie folgt interpretiert werden. Erfahrungsgemäß ist ein Verbund nur dann möglich, wenn die Überarbeitung beginnt, bevor der Verfüllbaustoff komplett ausgehärtet ist. Für diese fortgeschrittene Aushärtung steht ein hoher komplexer Schermodul. Bei zu schneller Überarbeitung weist der Verfüllbaustoff zumeist noch eine zu hohe Viskosität auf und kann durch thixotrope Effekte in Zusammenspiel mit den Kapillaren der darüber befindlichen Schicht und der Temperatur aus der HANV-Schicht „herausgezogen“ werden. Dies konnte bereits mehrfach in Laborversuchen durch einen Austritt des Verfüllbaustoffes an der Oberfläche der Asphaltzwischen-/deckschicht beobachtet werden. Dieser Aspekt wird über den Phasenwinkel bei der Reaktionskinetik beschrieben.

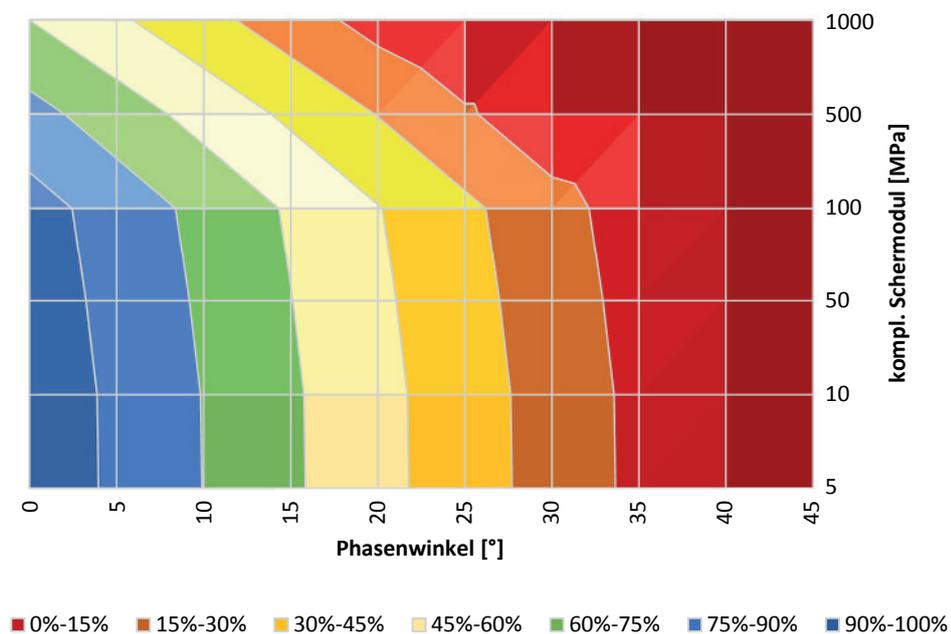
Im vorliegenden Fall wird eine Abreißfestigkeit von 0,7 MPa erreicht, wenn ein Niveau von über 60 % eingehalten wird. Im Vergleich zu den Änderungen des Asphaltträgergerüsts nimmt die Reaktionskinetik mit einer möglichen Spanne von 0,7 MPa einen höheren Stellenwert ein.

Im Abschnitt 4.2.4 wurde der Versuch unternommen ein Schnellverfahren zu entwickeln, um die optimale Zeitspanne zur Überarbeitung vor Ort in Abhängigkeit von verschiedenen Umgebungsbedingungen zu quantifizieren. Aufgrund der vorgenannten Zusammenhänge ist dies jedoch nicht möglich. Als Hauptgrund ist die Temperaturentwicklung infolge unterschiedlicher Volumina des Verfüllbaustoffes zu nennen, welche stark von den in Abschnitt 5.2 genannten Faktoren abhängig sind. Dies ermöglicht auch nicht den Vergleich zwischen den DSR-Untersuchungen (3 ml) und den beschriebenen Kugelversuchen mit 50 ml und 150 ml. Diese Aussage korreliert mit den Ergebnissen in Bild 10, in welchem erkennbar ist, dass erst nach über

100 bis 120 Minuten eine Vernetzungsreaktion der Harze zu erwarten ist. Dem gegenüber steht die schnellere Vernetzungsreaktion in Bild 29. Um ein aussagekräftiges Verfahren zu entwickeln sind weitergehende Untersuchungen unter Variation der Volumina notwendig.

Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die rheologischen Eigenschaften im ausgehärteten Zustand einen hohen Einfluss auf den Verbund mit einer Asphaltzwischen-/-deckschicht haben (vgl. Bild 51). Dabei sind im vorliegenden Fallbeispiel Abreißfestigkeiten zwischen 0 und 3,6 MPa festzuhalten. Wobei ein abnehmender Phasenwinkel (elastischeres Verhalten) das Niveau deutlicher begünstigt, als eine hohe Steifigkeit (kompl. Schermodul).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch der Verbund zur darüber liegenden Schicht deutlich von den Eigenschaften des Verfüllbaustoffes abhängig ist.



**Bild 51:** Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-/-deckschicht (100 % = 3,7 MPa, 0 % = 0,0 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Anteil der Luft von 0 Vol.-%, kompl. Schermodul von 0,2 MPa und ein Phasenwinkel von 28,5° kurz vor der Überarbeitung)

## 5.5 Biegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul

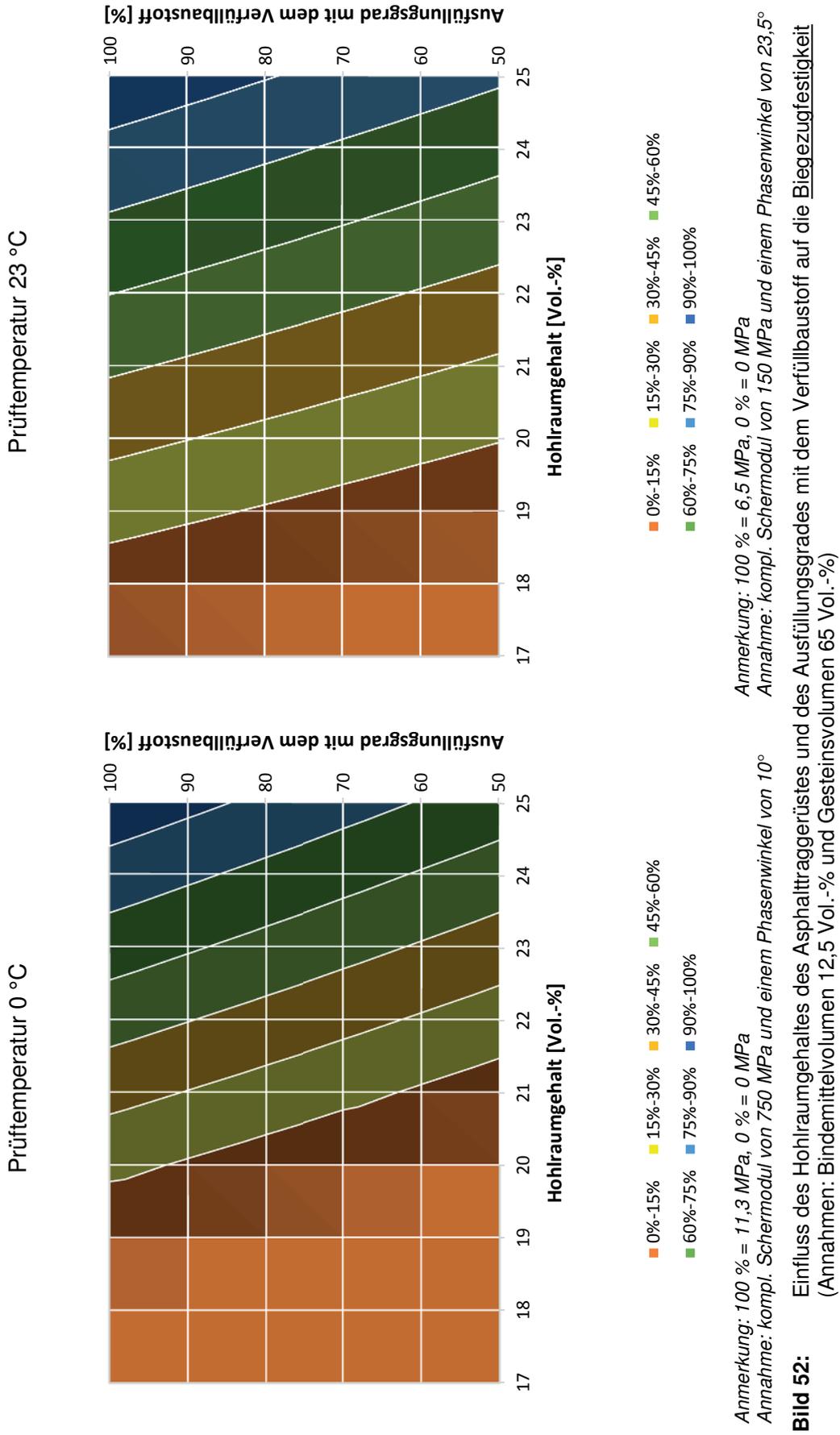
Die Biegezugfestigkeit wurde in Anlehnung an die Berliner Anforderungswerte für Gussasphalt in das Hinweispapier mit aufgenommen. Anhand des Quotienten der Biegezugfestigkeit kann eine Beurteilung über eine ausreichende Flexibilität der Schicht getroffen werden. Weiterhin ist es bei dem 3-Punkt Biegeversuch möglich ein temperaturabhängiges E-Modul abzuleiten. Es wurde zu beiden Ergebnissen eine Betrachtung mit der multiplen Regressionsanalyse durchgeführt. Diese mussten für jede Prüftemperatur (0 °C und 23 °C) getrennt durchgeführt werden, da die zwei Punktwolken sonst zu einer zu starken Verzerrung der Ergebnisse geführt hätten.

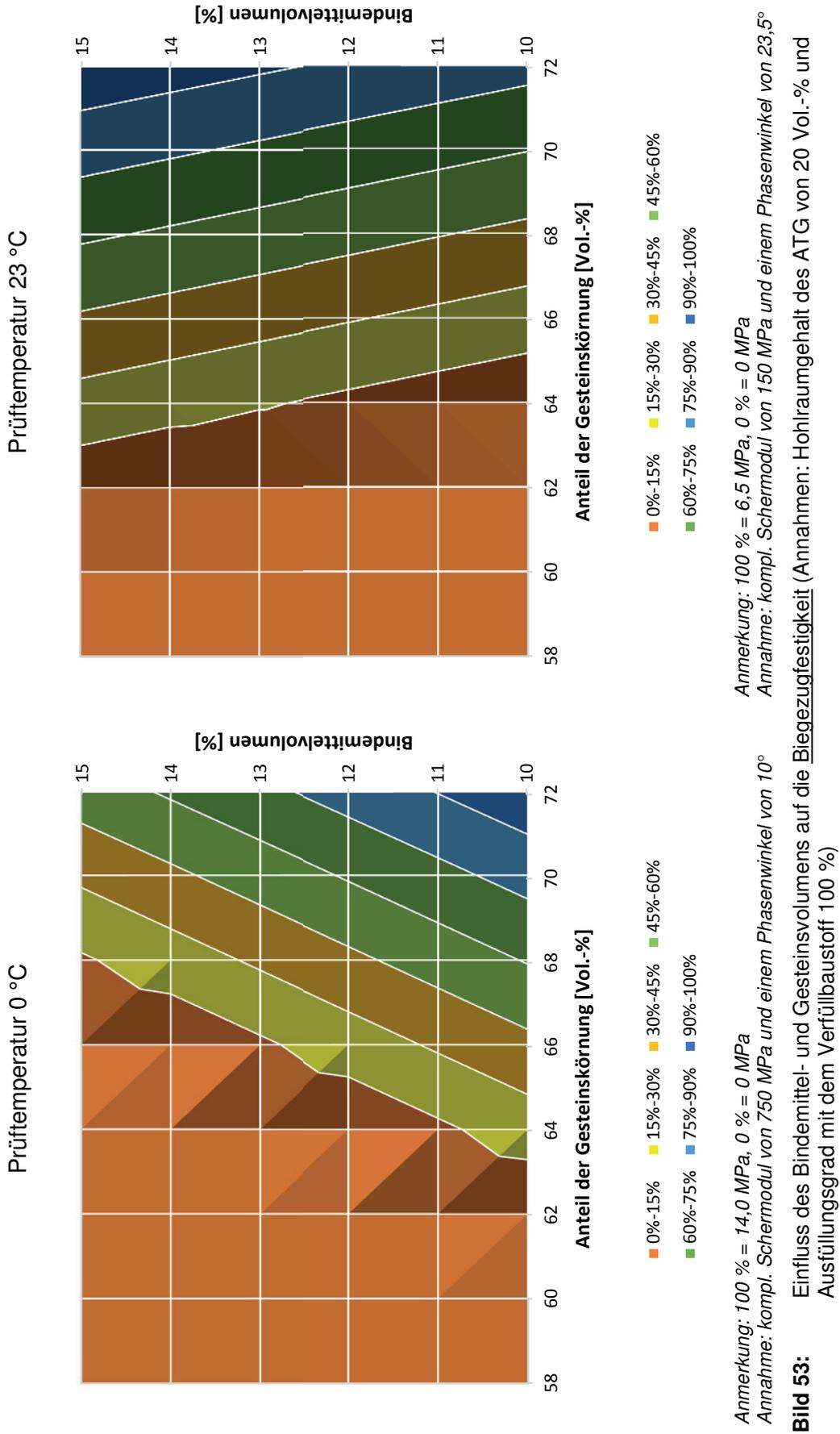
**Tabelle 13:** Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse  
– Biegezugfestigkeit der HANV-Schicht - Biegezugfestigkeit

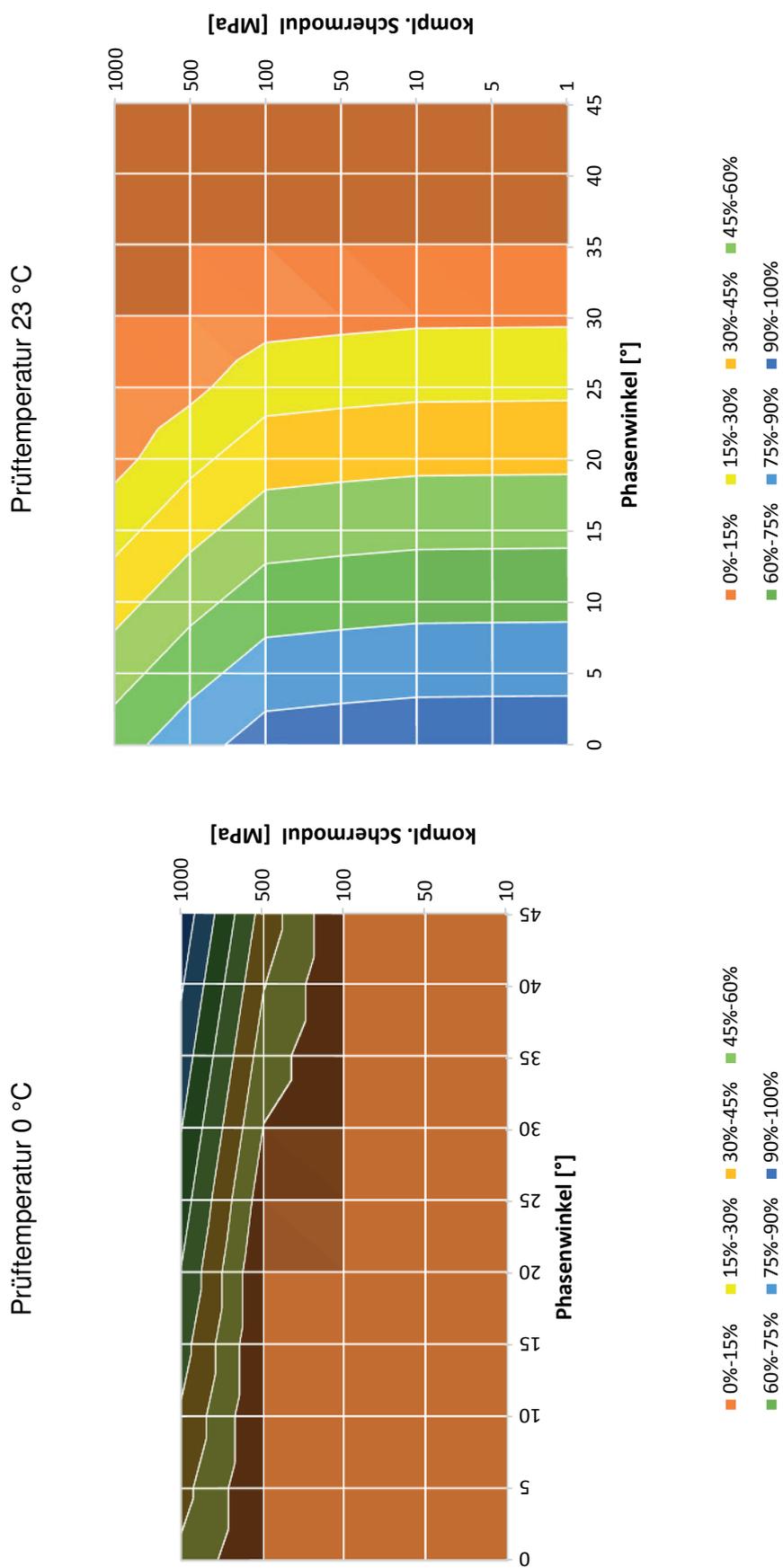
These: <b>Biegezugfestigkeit</b> $= S+a \cdot X_a+b \cdot X_b+c \cdot X_c+d \cdot X_d+e \cdot X_e+f \cdot X_f$					
Koeffizienten			Adjustiertes Bestimmtheitsmaß [%]		
Prüftemperatur [°C]	0	23	0	23	
Schnittpunkt (S)					
	-190,6364	-71,0276	70,0	93,4	
a	Volumen der Luft [Vol.-%]	1,5402			0,7366
b	Volumen des Verfüllbaustoffes [Vol.-%]	1,8297			0,8555
c	Bindemittelvolumen [Vol.-%]	-2,5626			0,3824
d	Gesteinsvolumen [Vol.-%]	2,6187			0,8824
e	kompl. Schermodul [MPa]	0,0204			-0,0026
f	Phasenwinkel [°]	0,2704			-0,2390

**Tabelle 14:** Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse  
– Biegezugfestigkeit der HANV-Schicht – E-Modul

These: <b>E-Modul</b> $= S+a \cdot X_a+b \cdot X_b+c \cdot X_c+d \cdot X_d+e \cdot X_e+f \cdot X_f$					
Koeffizienten			Adjustiertes Bestimmtheitsmaß [%]		
Prüftemperatur [°C]	0	23	0	23	
Schnittpunkt (S)					
	-559.878	122.850	79,3	97,2	
a	Volumen der Luft [Vol.-%]	2.872			-1.602
b	Volumen des Verfüllbaustoffes [Vol.-%]	4.799			-1.427
c	Bindemittelvolumen [Vol.-%]	10.307			-684,22
d	Gesteinsvolumen [Vol.-%]	5.746			-1.163
e	kompl. Schermodul [MPa]	-8,225			0,9388
f	Phasenwinkel [°]	-649,3			-148,85





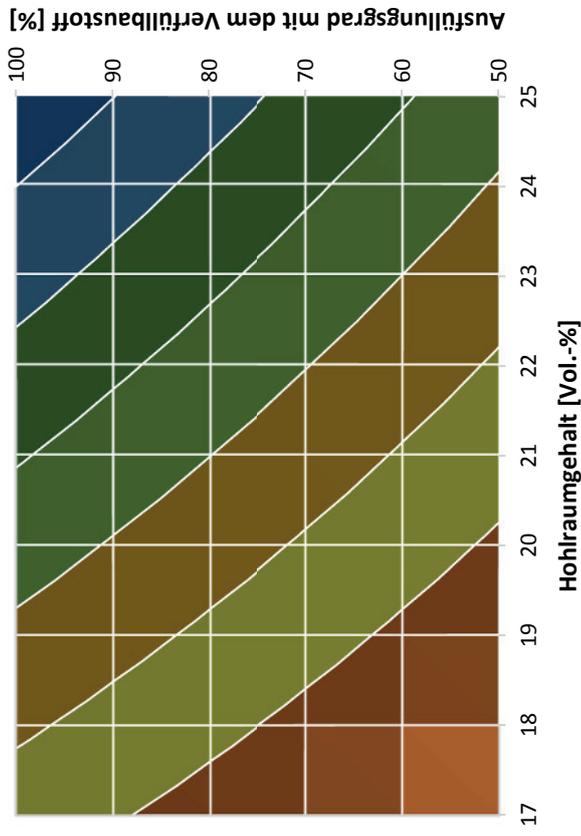


Anmerkung: 100 % = 16,7 MPa, 0 % = 0 MPa

Anmerkung: 100 % = 8,2 MPa, 0 % = 0 MPa

**Bild 54:** Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Biegezugfestigkeit (Annahmen: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff 100 %; Bindemittelvolumen 12,5 Vol.-% und Gesteinsvolumen 65 Vol.-%)

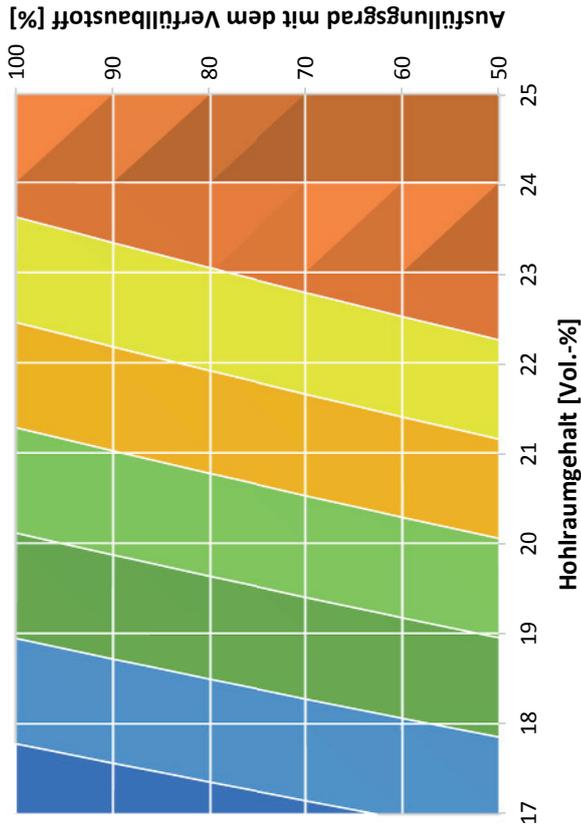
Prüftemperatur 0 °C



Anmerkung: 100 % = 49.764 MPa, 0 % = 0 MPa

Annahme: kompl. Schermodul von 750 MPa und einem Phasenwinkel von 10°

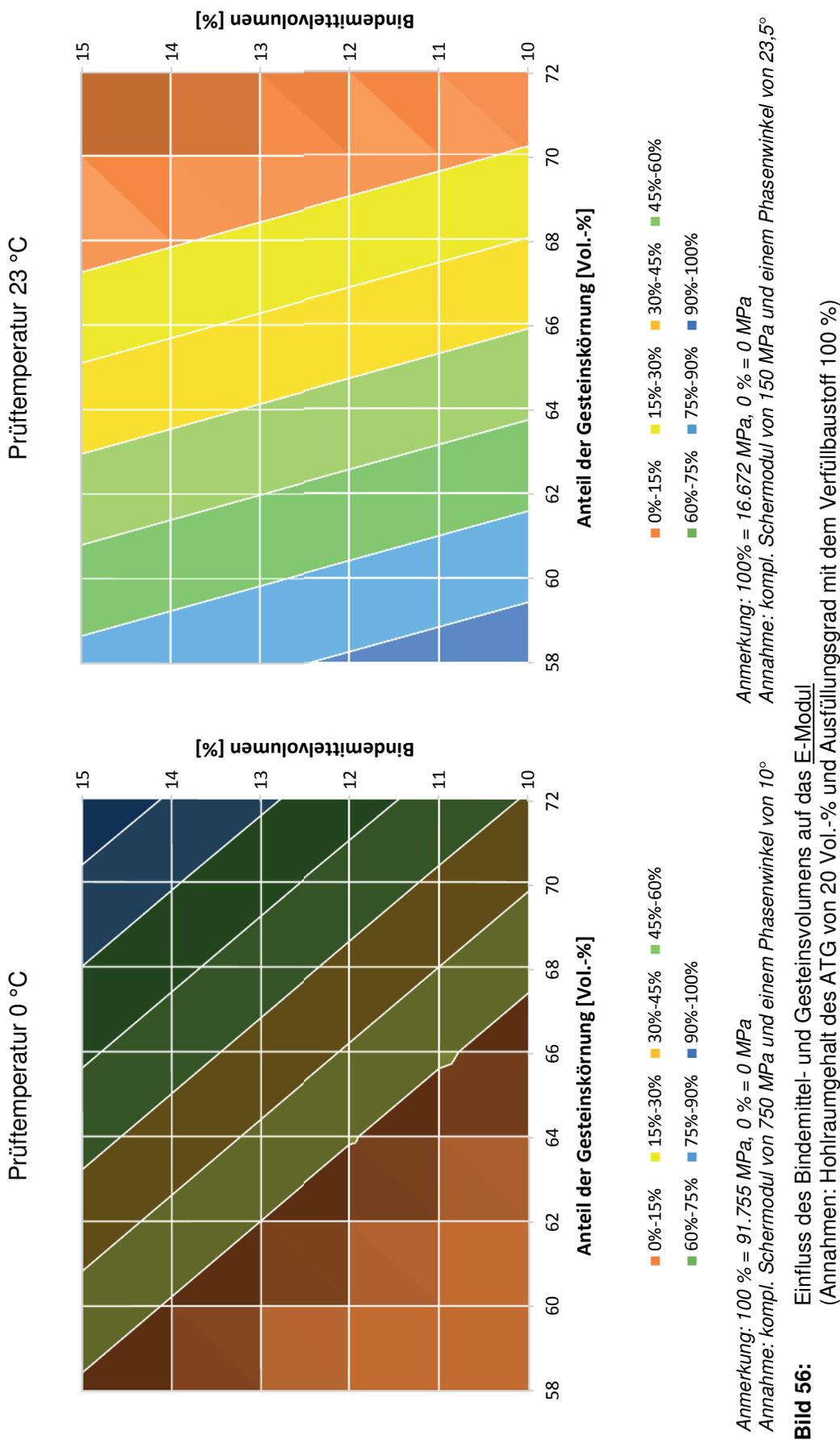
Prüftemperatur 23 °C

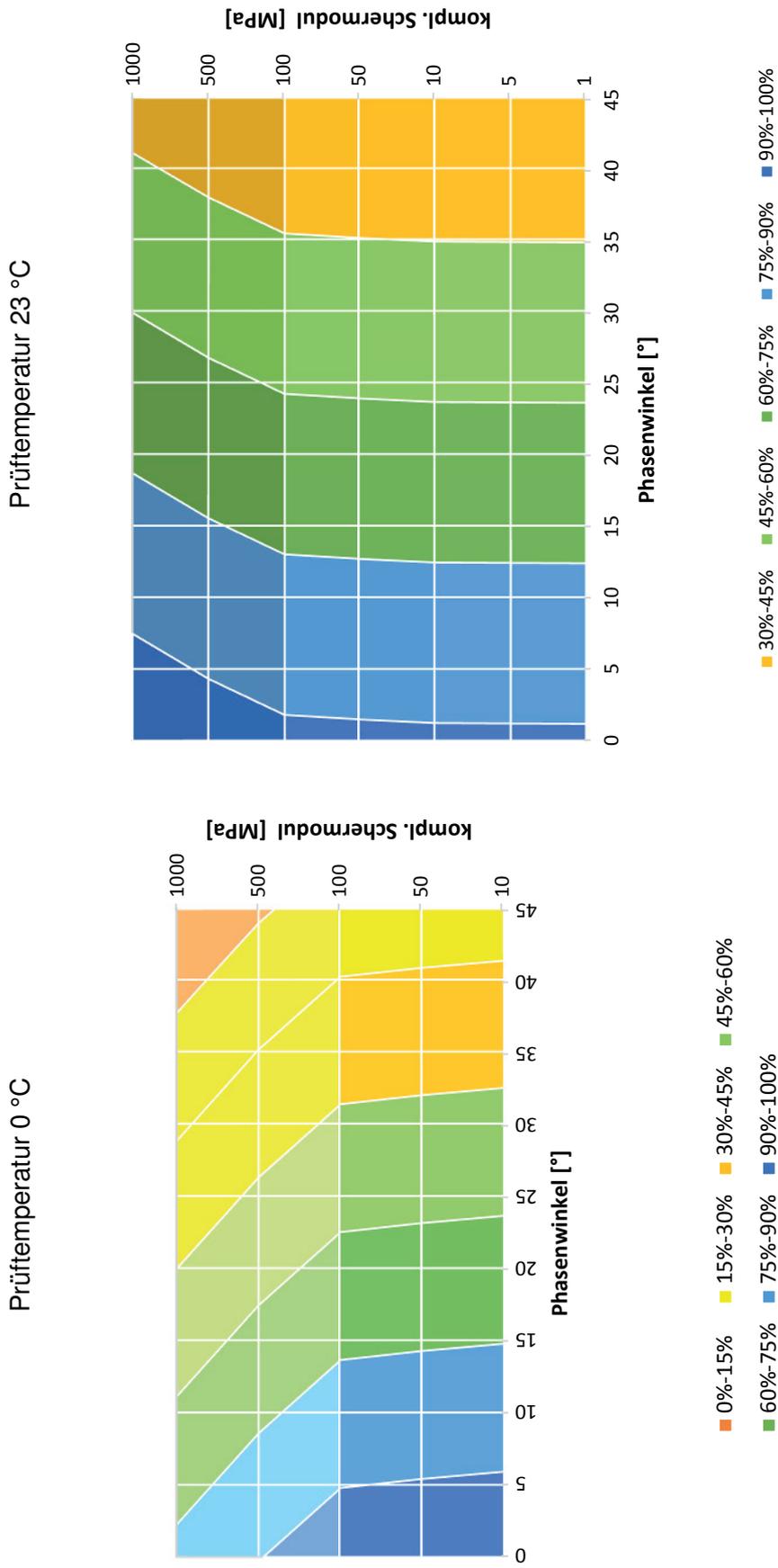


Anmerkung: 100 % = 11.104 MPa, 0 % = 0 MPa

Annahme: kompl. Schermodul von 150 MPa und einem Phasenwinkel von 23,5°

**Bild 55:** Einfluss des Hohlraumgehaltes des Asphalttraggerüstes und des Ausfüllungsgrades mit dem Verfüllbaustoff auf das E-Modul (Annahmen: Bindemittelvolumen 12,5 Vol.-% und Gesteinsvolumen 65 Vol.-%)





Anmerkung: 100 % = 38.347 MPa, 0 % = 0 MPa

Anmerkung: 100 % = 11.119 MPa, 31 % = 3.483 MPa

**Bild 57:** Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf das E-Modul (Annahmen: Hohlräumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff 100 %; Bindemittelvolumen 12,5 Vol.-% und Gesteinsvolumen 65 Vol.-%)

Die Einflüsse auf die Biegezugfestigkeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Mit zunehmendem Anteil des Verfüllbaustoffes steigt das Niveau der Biegezugfestigkeit unabhängig von der Prüftemperatur (vgl. Bild 52).
- Ein zunehmender Anteil an Gesteinskörnungen begünstigt unabhängig von der Prüftemperatur ein höheres Niveau der Biegezugfestigkeit (vgl. Bild 53). Bei einer Prüftemperatur von 23 °C ist der Bindemittelanteil als Einfluss auf die Biegezugfestigkeit vernachlässigbar. Bei einer Prüftemperatur von 0 °C steht der Bindemittelanteil in Relation zum Anteil der Gesteinskörnung. Mit zunehmenden Anteil der Gesteinskörnung muss der Bindemittelanteil bei einem konstanten Hohlraumgehalt abnehmen.
- Der Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes ist abhängig von der Prüftemperatur. Bei einer Temperatur von 23 °C wird das Niveau der Biegezugfestigkeit vorwiegend mit einem elastischeren Verhalten gesteigert. Bei einer Temperatur von 0 °C kann das Niveau der Biegezugfestigkeit vorwiegend mit einer höheren Steifigkeit gesteigert werden.

Bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls können die Einflüsse aus den volumetrischen Kennwerten, Baustoffen und Baustoffgemischen wie folgt interpretiert werden:

- Bei niedrigen Prüftemperaturen (0 °C) kann ein hoher Anteil des Verfüllbaustoffes positive Auswirkungen auf das Niveau des Elastizitätsmoduls nehmen. Bei einer Prüftemperatur von 23 °C liegt eine umgekehrte Relation vor (vgl. Bild 55).
- Der Anteil der Gesteinskörnungen hat bei einer Prüftemperatur von 23 °C einen höheren Einfluss auf das Ergebnis, als das Bindemittelvolumen. Mit abnehmendem Anteil der Gesteinskörnung wird der Elastizitätsmodul erhöht. Bei niedrigen Prüftemperaturen wird der Elastizitätsmodul durch einen hohen Anteil der Gesteinskörnung und des Bindemittelvolumens begünstigt (vgl. Bild 56).
- Der Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes deutet darauf hin, dass unabhängig von der Temperatur vorwiegend eine höhere Elastizität (geringer Phasenwinkel) zu einem höheren E-Modul führt.

## 5.6 Verhalten bei tiefen Temperaturen – Abkühl- und Zugversuch

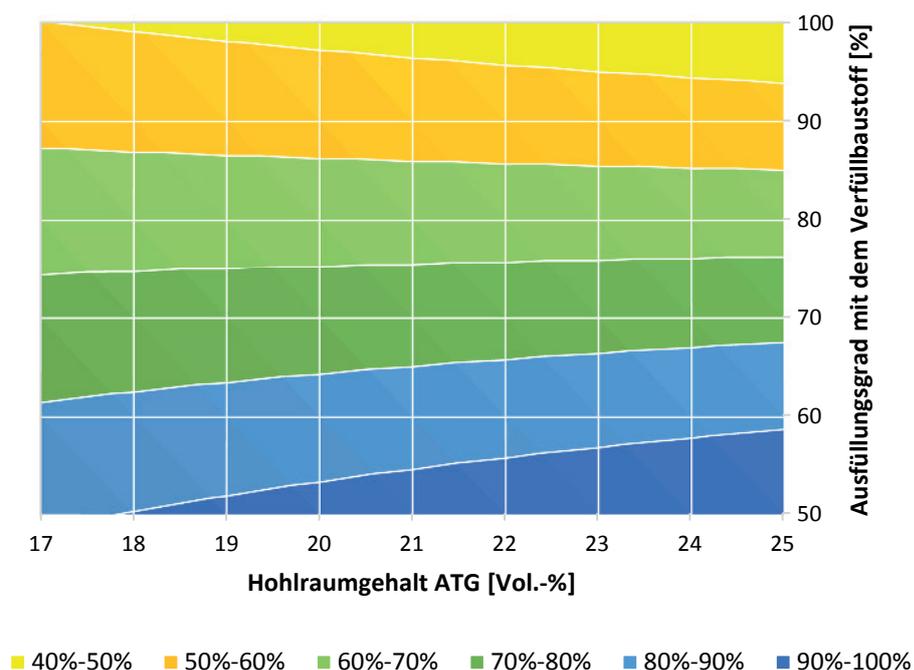
Neben den Gebrauchseigenschaften bei gemäßigten Temperaturen wurde ebenfalls die Kälteflexibilität untersucht. Ein Zusammenhang mit der Bruchtemperatur beim Abkühlversuch konnte aufgrund der geringen Anzahl an Datensätzen nicht betrachtet werden. Daher wurde Ersatzweise der Zusammenhang zu den Spannungen aus dem Abkühl- und Zugversuch bei einer Prüftemperatur von 20 °C, 5 °C und -10 °C untersucht. Somit ist eine theoretische Herleitung der Zugfestigkeitsreserve möglich. Nachfolgend sind die Ergebnisse zusammengefasst und werden anschließend erläutert.

**Tabelle 15:** Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse  
– Tieftemperaturverhalten der HANV-Schicht - Zugversuch

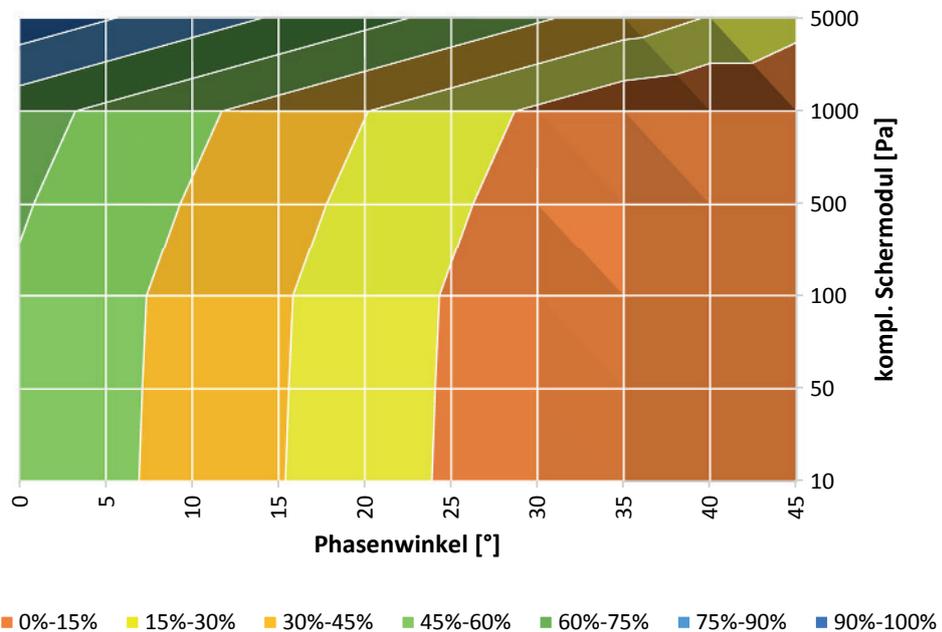
These: <b>Zugfestigkeit</b> $= S+a \cdot x_a+b \cdot x_b+c \cdot x_c+d \cdot x_d$		
Koeffizienten		Adjustiertes Bestimmtheitsmaß [%]
Schnittpunkt (S)		3,4266
a	Volumen der Luft [Vol.-%]	-0,0169
b	Volumen des Verfüllbaustoffes	-0,0056
c	kompl. Schermodul [MPa]	0,0010
d	Phasenwinkel [°]	0,0127
		94,5

**Tabelle 16:** Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse  
– Tieftemperaturverhalten der HANV-Schicht – Abkühlversuch

These: <b>kryogene Spannungen</b> $= S+a \cdot x_a+b \cdot x_b+c \cdot x_c+d \cdot x_d$		
Koeffizienten		Adjustiertes Bestimmtheitsmaß [%]
Schnittpunkt (S)		-0,3124
a	Volumen der Luft [Vol.-%]	0,1316
b	Volumen des Verfüllbaustoffes	-0,0321
c	kompl. Schermodul [MPa]	0,0004
d	Phasenwinkel [°]	-0,0862
		99,6

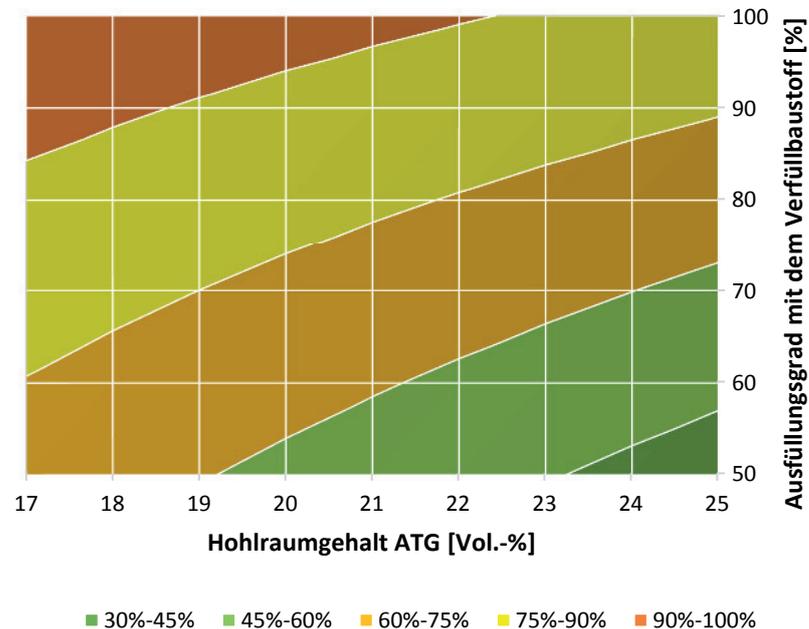


**Bild 58:** Einfluss des Asphalttraggerüstes und des Ausfüllungsgrades mit dem Verfüllbaustoff auf die Zugfestigkeit (100 % = 3,6 MPa, 43 % = 1,5 MPa, Annahme: kompl. Schermodul von 500 MPa und einem Phasenwinkel von 15°)

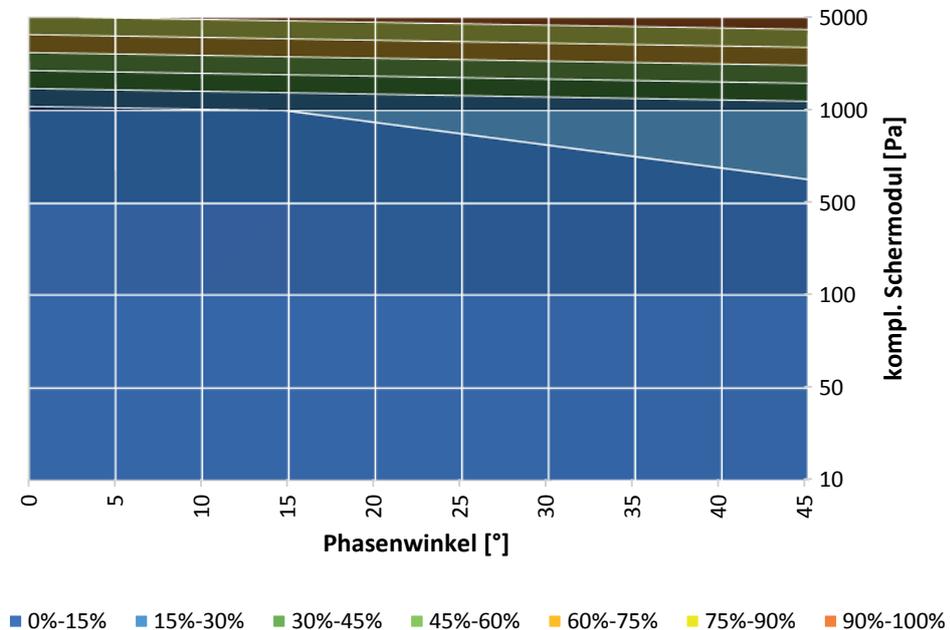


**Bild 59:** Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Zugfestigkeit (100 % = 4,9 MPa, 0 % = 0 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und Anteil der Luft von 0 Vol.-%)

Der Hohlraumgehalt bzw. das zur Verfügung stehende Hohlräumvolumen im Asphalttraggerüst für den Verfüllbaustoff scheint keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Zugfestigkeit zu nehmen. Das Verhältnis zwischen dem Anteil der verbliebenden Luft im HANV-System und dem Anteil des Verfüllbaustoffes hat einen höheren Einfluss auf die Zugfestigkeit. Mit zunehmendem elastischen Materialverhalten und hohen Steifigkeiten wird die Zugfestigkeit gesteigert. Wobei der Einfluss des Phasenwinkels höher erscheint.



**Bild 60:** Einfluss des Asphalttraggerüstes und dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff auf die kryogenen Spannungen (100 % = 0,3 MPa, 38 % = 0,1 MPa, Annahme: kompl. Schermodul von 500 MPa und einem Phasenwinkel von 15°)



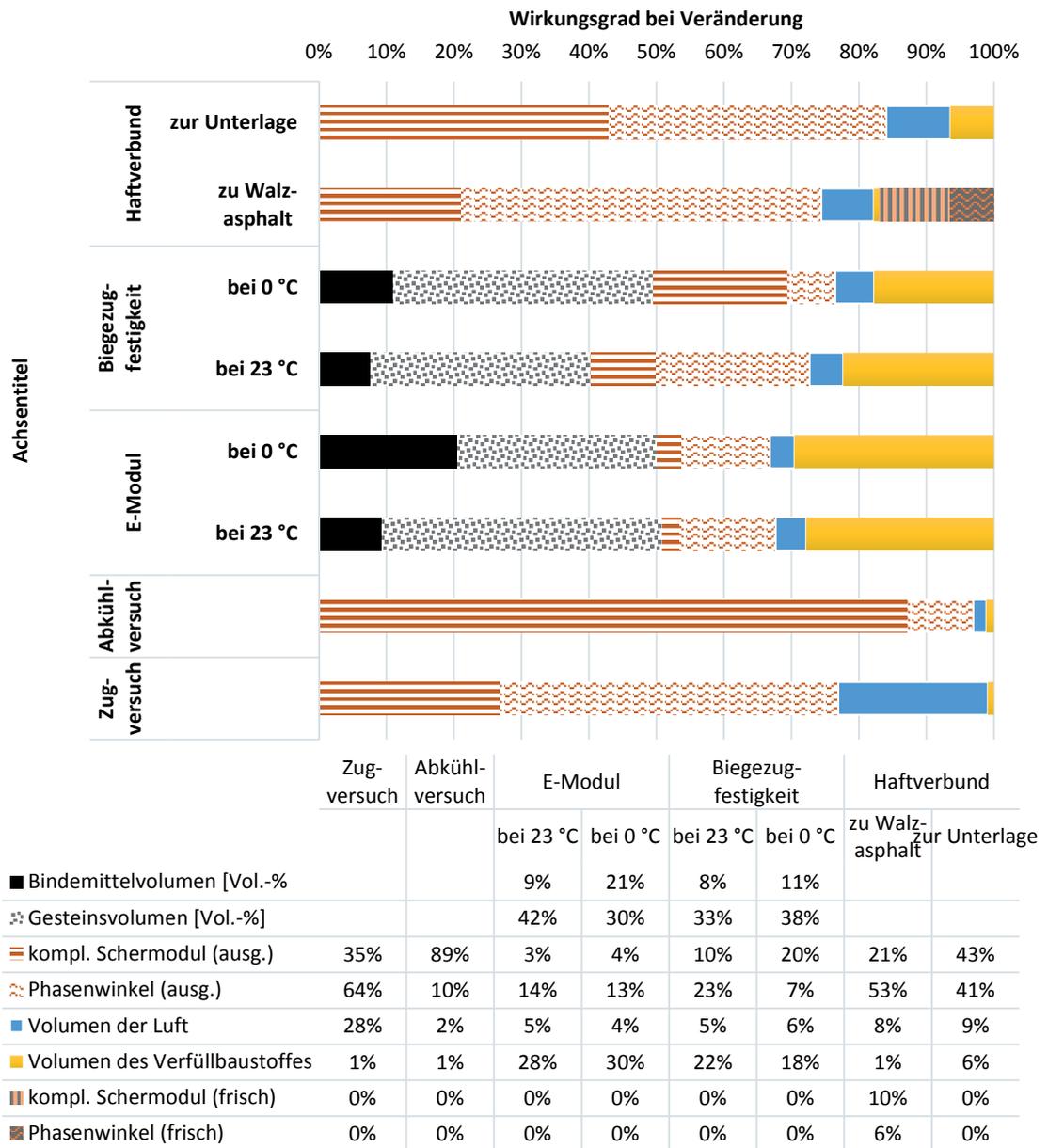
**Bild 61:** Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die kryogenen Spannungen (100 % = 5,3 MPa, 0 % = 0 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und Anteil der Luft von 0 Vol.-%)

Bei der Darstellung des Zusammenhanges zwischen den Ausgangsvariablen und den kryogenen Spannungen wurde die Einfärbung konträr zu den bisherigen Darstellungen gewählt. Eine abnehmende Spannung bei den Abkühlversuchen sollte einen positiven Einfluss auf die Zugfestigkeitsreserve nehmen.

Dies kann mit einem ausgeglichen Verhältnis zwischen dem Verfüllbaustoff und dem verbleibenden Anteil der Luft im HANV-System erreicht werden (vgl. Bild 60). Wobei ein zunehmender Anteil an Reaktionsharz positive Auswirkungen haben kann, wenn nicht alle Hohlräume ausgefüllt werden. Das rheologische Verhalten des Verfüllbaustoffes nimmt erst mit exponentiell zunehmender Steifigkeit einen Einfluss auf die kryogenen Spannungen. Das viskoelastische Materialverhalten wirkt sich nicht auf die kryogenen Spannungen aus.

## 5.7 Zusammenfassung und Validierung

Anhand der oben aufgeführten Betrachtungen kann von nachfolgenden Relationen der betrachteten Kennwerte ausgegangen werden (vgl. Bild 62). Es wird vorausgesetzt, dass auch Bindemittleigenschaften einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dieser Einfluss wird jedoch deutlich geringer eingeschätzt als jener des Verfüllbaustoffes. Grund für diese Annahme ist neben den Ausführungen in Abschnitt 5, dass die rheologischen Eigenschaften von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln deutlich viskosere Eigenschaften und geringere Steifigkeiten aufweisen. Bei den Betrachtungen konnten die Bindemittleigenschaften als konstant angenommen werden, da jede Probe die gleiche Bindemittelsorte 25/55-55 A aus dem gleichem Tank und gleicher Liefercharge enthält.



**Bild 62:** Normierte Darstellung der möglichen Einflüsse aus den Baustoffen und Baustoffgemischen auf die Kennwerte des HANV-Systems

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Eigenschaften des Verfüllbaustoffes die Kennwerte der HANV-Schicht stark beeinflussen. Die Eigenschaften des ATG oder der Erfolg beim Verfüllen erscheinen nur sekundär die Kennwerte zu beeinflussen. Im Sinne der Prozesssicherheit und Optimierung der Bauweise ist es sinnvoll die Verfüllbaustoffe hinsichtlich des Gebrauchsverhaltens näher zu charakterisieren und zu spezifizieren.

Zur Validierung der Betrachtungen wurden die rheologischen Kenndaten der Verfüllbaustoffe A, B und C mit den jeweiligen volumetrischen Kennwerten der HANV-Schicht bzw. des Asphaltträgergerüsts durchgerechnet und soweit möglich mit den Ergebnissen der Tabelle 6 verglichen. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Validierung zusammengestellt.

**Tabelle 17:** Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse nach Tabelle 4 der H HANV und Gegenüberstellung mit den berechneten Ergebnissen

Nr.	Art der Prüfung / Prüfgröße	Prüfverfahren	gemessene und arithmetisch ermittelte Prüfergebnisse der Verfüllbaustoffe									
			A		B				C			
			aus [23]	arithh.	$\Delta$	aus [24]	arithh.	$\Delta$	gem.	arithh.	$\Delta$	
3	Abreißfestigkeit : Systemaufbau: Betonunterlage – HANV-Schicht	DIN EN 13596 [N/mm <sup>2</sup> ]	Prüfung bei 8 °C									
			3,0	3,1	+0,1	1,8	1,3	-0,5	1,8	1,7	-0,1	
4	Abreißfestigkeit : Systemaufbau: Betonunterlage - HANV –Schicht - Asphaltzwischen- schicht/Asphaltdeckschicht	DIN EN 13596 [N/mm <sup>2</sup> ]	Prüfung bei 23 °C									
			2,2	2,6	+0,4	1,1	0,8	-0,3	0,9	1,0	+0,1	
		Prüfung bei 8 °C	nach 1 h überarbeitet									
			2,3	1,4	-0,9	0,9	1,4	+0,5	1,4	1,5	+0,1	
Prüfung bei 23 °C	nach 24 h überarbeitet											
	1,8	1,1	-0,7	0,7	1,2	+0,5	0,8	0,9	+0,1			
5	Biegezugfestigkeit an HANV Probekörpern, Durchbiegung, Bruchdehnung und E- Modul bei 0 °C und 23 °C Bruchverhalten bei 0 °C	Anlage B der HANV	Prüfung bei 0 °C									
			12,1	12,1	$\pm 0$	10,6	10,7	+0,1	7,7	7,7	$\pm 0$	
		Prüfung bei 23 °C	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]									
			7,1	7,2	+0,1	3,2	3,2	$\pm 0$	2,4	2,4	$\pm 0$	
Quotient (23 °C/0 °C)			Bruchverhalten bei 0 °C									
			0,59	0,60	+0,01	0,30	0,30	$\pm 0$	0,31	0,31	$\pm 0$	

Die berechneten Kennwerte der Abreißfestigkeiten zur Unterlage und zur Asphaltzwischen-/Asphaltdeckschicht, sowie der Biegezugfestigkeit korrelieren gut mit den geprüften Systemen aus [23] und [24]. Größere Abweichungen zwischen den Werten bei Verfüllbaustoff A und B können auch auf nicht ideal ausgefüllte Systeme zurückgeführt werden. Dies wurde bei den damaligen Grundprüfungen nicht berücksichtigt. Weiterhin wurde bei den Grundprüfungen der Stellenwert der Luftfeuchtigkeit auf die Aushärtungsbedingungen nicht berücksichtigt.

## 6 Statische Wirkung einer HANV-Schicht

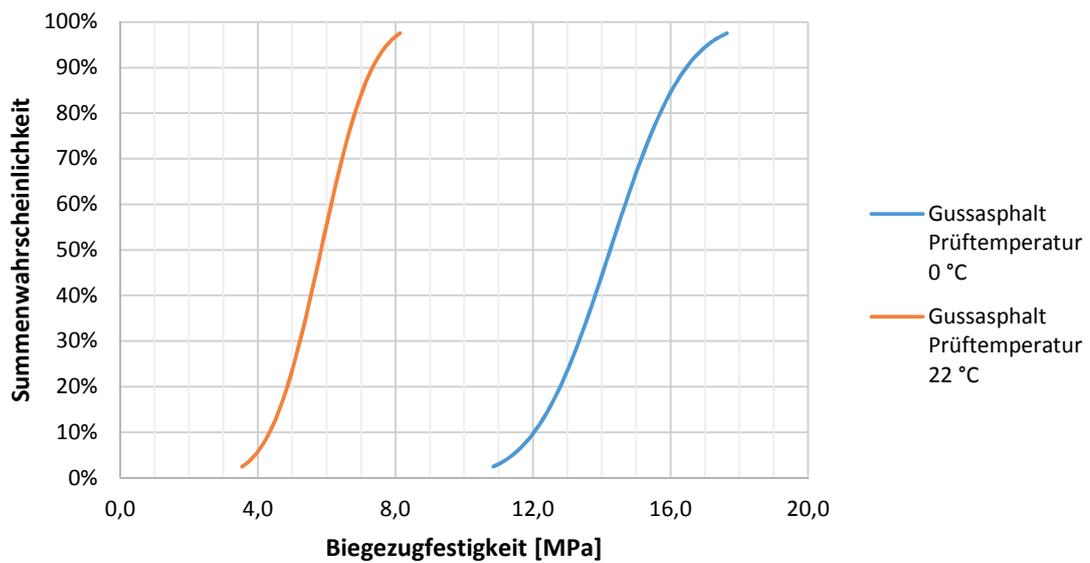
Zur Quantifizierung der statischen oder gar dynamischen Anrechenbarkeit einer HANV-Schicht bei der Bemessung von orthotropen Platten sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Im nachfolgenden Abschnitt wird der Versuch unternommen, eine vereinfachte Betrachtung der Problematik vorzunehmen.

Gegenüber einem konventionellen Überbau mit Gussasphalt liegt der Vorteil des HANV-Belages bei der geringen Verarbeitungstemperatur des Asphalttraggerüstes von optimal 120 °C. Nach Beobachtungen bei Belagserneuerungen auf Stahlbrücken scheint es, dass vermehrt Rissbildungen an der Bauwerkskonstruktion erkennbar waren, wenn eine Erneuerung des Fahrbelages stattgefunden hatte. Bisher wird vermutet, dass die hohen Temperaturen von bis zu 230 °C in Kombination mit unzureichenden Schweißnahtqualitäten ausschlaggebend hierfür sind [27]. Dies ist ein Vorteil des HANV-Systems auf orthotropen Fahrbelagplatten gegenüber einem Gussasphalt. Bei Einsatz einer HANV-Schicht auf Stahlplatten sollte eine vergleichbare oder geringere Durchbiegung vorliegen, um eine statische Wirksamkeit zugrunde zu legen. Dies kann unabhängig vom statischen System behauptet werden, wenn zumindest eine äquivalente oder höhere Biegesteifigkeit ( $EI$ ) der HANV-Schicht im Vergleich zu einem konventionellen Gussasphalt vorliegt. Dieses Vorgehen wurde bereits im Forschungsprojekt „HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden“ [28] prinzipiell verfolgt.

Bei gleichen Geometrien zwischen der HANV-Schicht und einer Gussasphaltschicht, kann das Flächenträgheitsmoment 2. Grades ( $I$ ) als Konstante angenommen werden. Somit ist unabhängig vom statischen System für einen hohen Widerstand gegen Verformung infolge von Biegung ein hoher Elastizitätsmodul erforderlich. Bei viskoelastischen Baustoffen oder Baustoffgemischen nimmt dieser mit zunehmender Temperatur zumeist ab. Aus älteren Erhebungen zur Biegezugfestigkeit von Gussasphalt ist bekannt, dass die bisherigen Asphaltmischgutsorten, welche die Anforderungen<sup>3</sup> bestanden, eine wie folgt dargestellte Verteilung der Biegezugfestigkeit aufweisen:

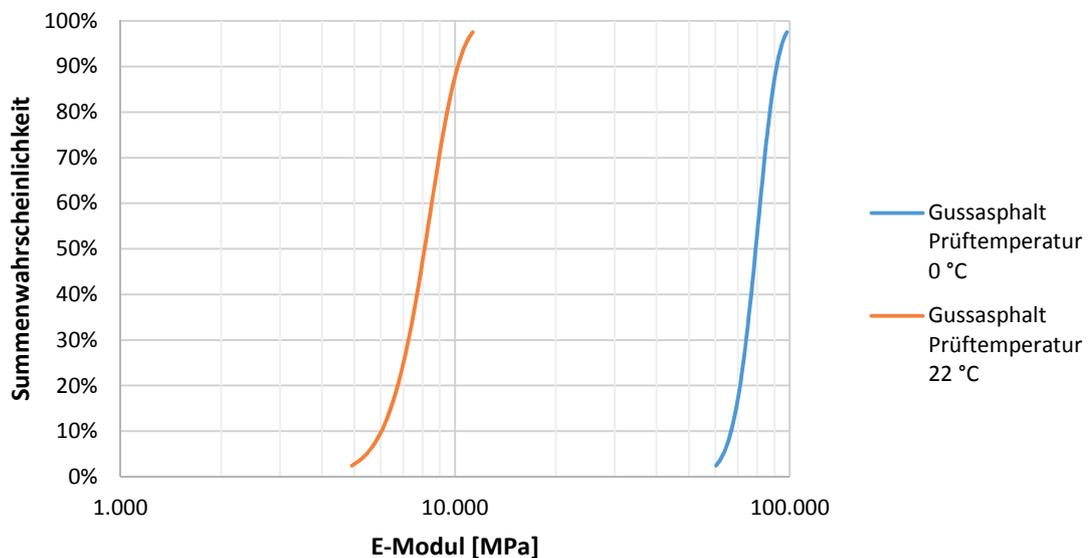
---

<sup>3</sup> Durchbiegung bei einer Prüftemperatur von 0 °C bei der Bestimmung der Biegezugfestigkeit mindestens 0,3 mm und Quotient der Biegezugfestigkeit (22 °C/0 °C) von maximal 0,6.



**Bild 63:** Verteilung der Biegezugfestigkeit von Gussasphaltprismen nach [29] (n = 390)

Anhand der Biegezugfestigkeit und der Annahme, dass alle Prüfkörper eine Durchbiegung von mindestens 0,3 mm bei einer Temperatur von 0 °C schadlos ertragen können bzw. die Bruchdehnung bei 22 °C um das Vierfache höher ist [29], kann eine Verteilung des Elastizitätsmoduls bestimmt werden.



**Bild 64:** Verteilung des Elastizitätsmoduls von Gussasphaltprismen nach [29] (n = 390)

Die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Reaktionsharze würden bei einer Schichtdicke von 2 cm aufgrund unterschiedlicher Ausfüllungsgrade mit dem Verfüllbaustoff infolge des Hohlraumgehaltes zu den nachfolgenden Elastizitätsmoduln bei 23 °C führen. Von der Betrachtung unberücksichtigt bleibt die Verfüllbarkeit, welche pauschal mit einem kompl. Schermodul von 100 Pa einheitlich angenommen wurde.

**Tabelle 18:** Veränderung des Elastizitätsmoduls infolge unterschiedlicher Reaktionsharze und Hohlraumgehalte des ATG bei einer Schichtdicke von 2 cm

Verfüllbaustoff	A		B		C	
	17	25	17	25	17	25
Hohlraumgehalt [Vol.-%]						
Anteil der Luft [Vol.-%]	4,4	2,8	4,4	2,8	4,4	2,8
Anteil des Verfüllbaustoffes [Vol.-%]	12,6	22,2	12,6	22,2	12,6	22,2
Ausfüllungsgrad [%]	73,8	88,6	73,8	88,6	73,8	88,6
Bindemittelvolumen [Vol.-%]	13,8	12,5	13,8	12,5	13,8	12,5
Gesteinsvolumen [Vol.-%]	69,2	62,5	69,2	62,5	69,2	62,5
E-Modul [MPa]	7.900	5.400	3.500	1.000	4.000	1.500

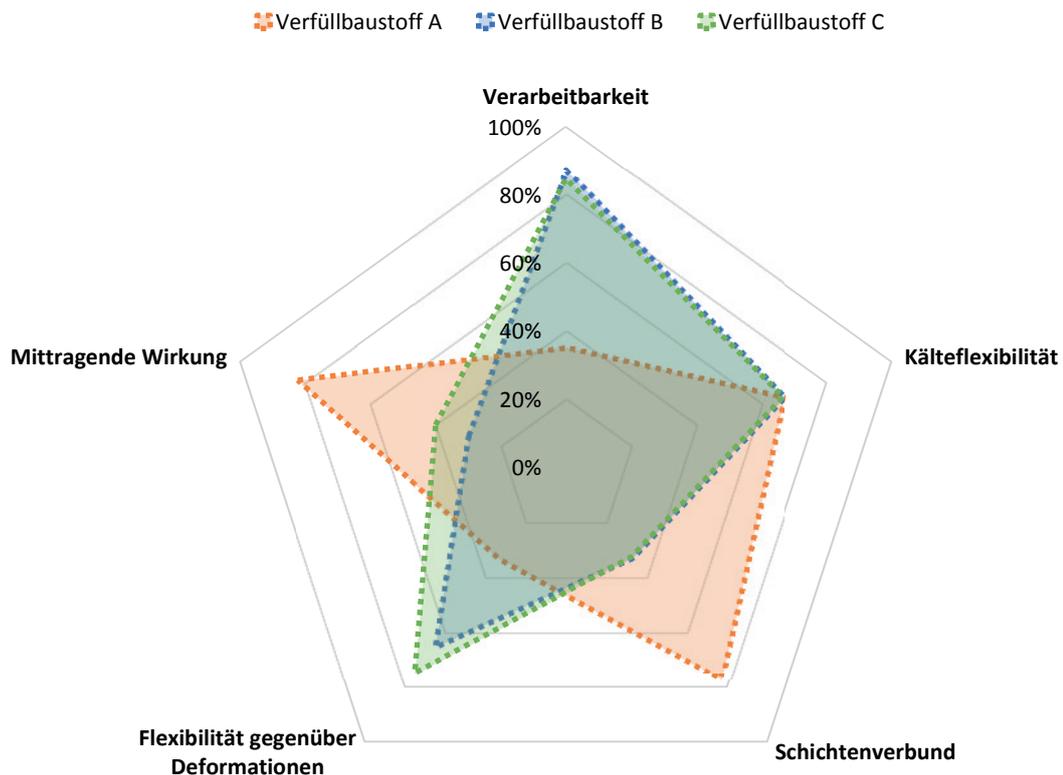
Mit dem Verfüllbaustoff A wird unabhängig vom Hohlraumgehalt ein Elastizitätsmodul erreicht, welches vergleichbar mit dem Niveau einer Gussasphaltschicht ist. Die viskoserer Verfüllbaustoffe B und C kommen nicht an dieses Niveau heran. Dies liegt neben der niedrigeren Steifigkeit vor allem auch an der hohen theoretischen Durchbiegung im Vergleich zum Verfüllbaustoff A. Der Verfüllbaustoff C wäre denkbar für eine Abdichtung auf einer Brücke mit starker Durchbiegung unter einer schützenden Schicht. Hierfür wären jedoch weitere Versuche nötig (z.B. Dynamische Prüfungen).

Die hohe Beständigkeit gegen Verformungen bei hohen Temperaturen, welche in [28] mit den geringeren Eindrücken im Bereich der Lasteinleitung beschrieben werden, können das Produkt eines höheren Kraftverteilungswinkels in der HANV-Schicht gegenüber dem Gussasphalt sein und würden die dort beschriebenen geringeren Schubspannungen erklären. Für eine genauere Aussage bedarf es weiterer Untersuchungen, die gezielt den inneren Reibungswinkel ansprechen.

## 7 Zusammenfassung und Empfehlungen

### 7.1 Einfluss der Verfüllbaustoffe auf die Eigenschaften der HANV-Schicht

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Verfüllbaustoffe einen signifikanten Einfluss auf die Schichteigenschaften nehmen (vgl. Bild 62). Die drei untersuchten Reaktionsharze zeigten ihre Qualitäten in unterschiedlichen Bereichen. Diese können grob in die Verarbeitbarkeit, die Kälteflexibilität, den Schichtenverbund, die Flexibilität gegenüber Deformationen und die mittragende Wirkung differenziert werden. Nachfolgend wurden die Ergebnisse halbquantitativ, unterschieden nach Verfüllbaustoffen und deren Eigenschaften zusammengefasst.



**Bild 65:** Halbquantitative Beurteilung der drei untersuchten Verfüllbaustoffe

#### Verarbeitbarkeit

Die Verfüllbaustoffe B und C weisen nicht nur in der Viskosität (vgl. Tabelle 1) eine weitaus geringeres Niveau auf als der Verfüllbaustoff A, auch beim Verfüllen von Probeplatten ist eine deutlich bessere Penetrierbarkeit bemerkbar.

#### Kälteflexibilität

Anhand der rheologischen Eigenschaften konnte für die Verfüllbaustoffe B und C eine höhere Steifigkeit in Kombination mit einem höheren Phasenwinkel nachgewiesen werden. Bei der Rissüberbrückungsfähigkeit negierten sich diese Aspekte im Vergleich zum Verfüllbaustoff A. Daher wird von einem vergleichbaren Verhalten bei tiefen Temperaturen ausgegangen.

#### Schichtenverbund und mittragende Wirkung

In beiden Betrachtungsfällen ist eine hohe Steifigkeit und Elastizität der Reaktionsharzbasis von Vorteil. Dementsprechend führt der Verfüllbaustoff A gegenüber den Varianten B und C in diesem Merkmal zu günstigeren Eigenschaften der Schicht.

#### Flexibilität gegenüber Deformation

Wenn Deformationen bei mittleren und höheren Gebrauchstemperaturen erwünscht sind, um Verformungen der Konstruktion schadlos zu ertragen, dann führt der Verfüllbaustoff C zu den besten Eigenschaften.

## 7.2 Empfehlungen für die Praxis

Für die Praxis werden nachfolgend Empfehlungen auf der Basis der Erkenntnisse und Zusammenhänge abgeleitet:

### Empfehlungen zur Anpassung und Ergänzung der volumetrischen Kennwerte des Asphaltträgerüstes:

- Die Schichtdicke des Asphaltträgerüstes sollte so angepasst werden, dass ein Ausfüllungsgrad von mindestens 75 % erreicht werden kann. Bei zu hohen Schichtdicken nimmt der Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff exponentiell ab (vgl. Bild 44).
- Es wird empfohlen die Spannweite des Hohlraumgehaltes zugunsten des Ausfüllungsgrades in der Erstprüfung auf 20 Vol.-% bis 25 Vol.-% zu beschränken.
- Die Bestimmung des Hohlraumgehaltes sollte abweichend von der H HANV an Asphaltplatten mit einer Höhe von 3 cm vorgenommen werden, welche entsprechend den Anweisungen nach M OPA hergestellt wurden.

### Empfehlungen zur Anpassung und Ergänzung der Prüfung am Verfüllbaustoff:

- Die Tabelle 3 der H HANV basiert auf Untersuchungen der TP-BEL-EP und Erfahrungen mit einem Reaktionsharz. Es zeigte sich, dass einige Kennwerte, nur charakterisierender Natur sind und keinen Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften haben. Mit den Untersuchungen im DSR konnten sehr gute und für die Eigenschaften der Schicht bedeutsame Ergebnisse nachgewiesen werden, welche einen Einblick in das viskoelastische Verhalten über das komplette Temperaturspektrum von -20 °C bis 60 °C erlauben. Es wird empfohlen zur Erfahrungssammlung Untersuchungen entsprechend der Tabelle 5 an erhärteten Stoffen durchzuführen.
- Für die Untersuchung an angemischten bzw. erhärteten Stoffen sollten einheitlich die Aushärtungsbedingungen festgelegt werden. Es empfiehlt sich neben dem Normklima bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte auch eine praxisrelevante Aushärtungstemperatur von 60 °C mit zu betrachten. Es sollte ein Zeitfenster für die Prüfung nach der Aushärtung definiert werden.
- Eine maximale Begrenzung des Biegemoduls und die Biegedehnung im Sinne einer mittragenden Wirkung sind nicht zielführend. Es wird empfohlen eine untere Begrenzung vorzunehmen bzw. die Prüfung nicht mehr durch zu führen, da diese nach Ansicht der Verfasser nur charakterisierender Natur ist.
- Die Wasseraufnahme sollte zur Erfahrungssammlung weiterhin durchgeführt werden. Aus den vorangegangenen Prüfungen ist jedoch bekannt, dass eine Überschreitung von 4 M.-% nicht gleich ein Versagen bzw. Volumenzunahme des Systems bei zum Beispiel der Wasseraufnahme im Vakuum führt. Es wird empfohlen den Anforderungswert herauszunehmen und zur weiteren Erfahrungssammlung die Prüfung in der Grundprüfung weiter durch zu führen.

### Empfehlungen zur Anpassung und Ergänzung der Grundprüfung an der HANV-Schicht:

- Die vollständige Verfüllung der HANV-Schicht sollte nicht als Sichtprüfung nachgewiesen werden, sondern als Vergleich der Massenänderung der Prüfkörper vor und nach dem Verfüllen im Bezug zum Hohlraumgehalt des ATG. Als Anforderung wird ein Mindestausfüllungsgrad von 75 % empfohlen. Es wird weiterhin empfohlen eine Mindesttemperatur des ATG V beim Verfüllen von 20 °C zu fordern, um negativen Einflüsse aus der signifikanten Viskositätserhöhung der Reaktionsharze bei niedrigeren Temperaturen ausschließen zu können.
- Es konnte nachgewiesen werden, dass je nach zu prüfendem Kennwert ein niedriger Hohlraumgehalt mit geringem Ausfüllungsgrad bzw. ein hoher Hohlraumgehalt mit hohem Ausfüllungsgrad das Ergebnis positiv beeinflusst. Hinsichtlich der Prozesssicherheit sollten die Prüfkörper bei der Grundprüfung so hergestellt werden, dass die schlechtesten zu erwartenden Kennwerte angestrebt werden. Somit kann während der Grundprüfung abgesichert

werden, dass trotz ungünstiger Einbaubedingungen oder unterschiedlicher Hohlraumgehalte in der Fläche anforderungsgerechte Kennwerte erreicht werden.

Nachfolgend sind die Empfehlung für die Grundprüfungen an der HANV-Schicht tabellarisch zusammengetragen.

**Tabelle 19:** Empfehlung für die Grundprüfung an der HANV-Schicht

Nr.	Art der Prüfung / Prüfgröße	Empfohlene Anforderungen bei der Grundprüfung
1	Vollständige Verfüllung der HANV-Schicht bei 20 °C, einem Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und einer Schichtdicke von 4 cm, Temperierung der Asphaltplatten (mind. 26 cm x 32 cm) und der Ausgangsstoffe des Verfüllbaustoffes für mind. 24 h	Mind. 75 % des $H_{bit\ ATG}$ müssen mit dem Verfüllbaustoff gefüllt sein. Nachweis über Rückwägung an drei Asphaltplatten.
3a	Abreißfestigkeit: Systemaufbau: Betonunterlage – HANV-Schicht bei 23 °C	$\geq 0,7\text{ N/mm}^2$
3b	Abreißfestigkeit: Systemaufbau: HANV –Schicht ( <i>Schichtdicke 2 cm, <math>H_{bit}</math> 25 Vol.-%, Verfülltemperatur 60 °C, Lagerung danach bei 23 °C und 50 % rel. LF.</i> ) - SMA 8 / 11 S ( <i>Überarbeitung 1 h, 2 h und 24 h nach dem Verfüllvorgang</i> ) bei 23 °C	$\geq 0,7\text{ N/mm}^2$ nach 1 h Wartezeit zwischen dem Verfüllvorgang und der Überarbeitung.  Angabe des Zeitpunktes, wenn das Niveau von $0,7\text{ N/mm}^2$ unterschritten wird.
4	Biegezugfestigkeit an HANV Probekörpern, Durchbiegung, Bruchdehnung und E-Modul bei 0 °C und 23 °C Bruchverhalten bei 0 °C Nachzuweisne an Prismen, welche aus den Platten aus 1 hergestellt wurden.	0 °C
		23 °C
5	Wasserundurchlässigkeit HANV ohne Schadensvorbeanspruchung. Nachzuweisen an mind. 2 Bohrkernen ( $\varnothing 150\text{ mm}$ ) aus Nr. 1	kein Druckverlust [1bar/3 h]
6	Wasseraufnahme im Vakuum. Nachzuweisen an mind. 2 Bohrkernen ( $\varnothing 150\text{ mm}$ ) aus Nr. 5	$\leq 3,0\text{ Vol.-%}$

Empfehlungen zur Anpassung und Ergänzung der Prüfung an einer eingebauten HANV-Schicht:

- Die Bauweise ist für Wochenendmaßnahmen prädestiniert. Dies hat zur Folge, dass auch die Prüfung zügig und zumeist ein Tag nach dem Einbau vor Ort durchgeführt werden müssen. Aus eigenen Erfahrungen bei Kontrollprüfungen mit der Bauweise ist bekannt, dass die Abreißfestigkeit zur Unterlage und zur Asphaltzwischen-schicht auch erst nach einer Woche ein ausreichendes Niveau erreicht. Grund hierfür können geringfügig weiterführende Vernetzungen des Verfüllbaustoffes darstellen (vgl. Bild 9 bis Bild 11). Auf diesen Aspekt sollte in der HANV hingewiesen werden. Nicht bestandene Prüfungen kurz nach dem Einbau sollten mindestens eine Woche später erneut hinsichtlich ihrer Aussagekraft validiert werden, um einen Mangel nachzuweisen.

### 7.3 Weiterer Forschungsbedarf

Trotz großer Unterschiede in der Viskosität im Verarbeitungs- und oberen Gebrauchstemperaturbereich, gleichen sich bei allen bisher verwendeten Reaktionskunststoffen die rheologischen Eigenschaften bei tiefen Temperaturen an. Um HANV-Schichten hinsichtlich der Rissüberbrückungsfähigkeit zu optimieren, sollte weiter nach alternativen Verfüllbaustoffen geforscht werden. Auf der Grundlage der Untersuchungen sollten Verfüllbaustoffe zum Einsatz kommen, welche eine geringere Steifigkeit einhergehend mit einem ausgeprägten elastischen Verhalten im Bereich tiefer Temperaturen aufweisen. Gleichmaßen muss jedoch eine hohe Steifigkeit bei hohen Gebrauchstemperaturen gefordert werden, um den Widerstand gegen bleibende Verformungen und den Haftverbund zu benachbarten Schichten gewährleisten zu können. Die untersuchten Verfüllbaustoffe weisen entweder eine zu hohe Steifigkeit bei geringen Temperaturen auf beziehungsweise eine zu geringe Steifigkeit bei hohen Temperaturen.

Die Verfüllbaustoffe sollten hinsichtlich des Anwendungszweckes (hohe Durchbiegung oder Lastabtrag) in Vergesellschaftung mit dem Asphaltträger optimiert werden. Eine universelle Lösung aller Beanspruchungsarten erscheint nach jetzigem Stand nicht möglich.

Weiterhin sollte der innere Lastabtragungswinkel der Schicht näher untersucht werden. Hier wird der Vorteil der HANV-Schicht gegenüber einem in der volumetrischen Betrachtung äquivalentem Gussasphaltes vermutet.

## 8 Literatur

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 7 Brückenbeläge, Abschnitt 1: Brückenbeläge auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn/ Abschnitt 2: Brückenbeläge auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus zwei Bitumen-Schweißbahnen/ Abschnitt 3: Brückenbeläge auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff/ Abschnitt 5: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl - ZTV-ING - Teil 7 Abschnitt 1- 3 und 5
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen auf Beton – ZTV-BEL-B Teil 1 - 3
- [3] Peter Weyer: Standfeste Sonderbeläge Straßen und Tiefbau Heft 3/98
- [4] H. Neuß, R. Stratmann, T. Sikinger, N. Simmleit, H. Pucker und P. Hatebur: Kompletterneuerung einer Brückenabdichtung an einem Wochenende, Straße + Autobahn 8/2003
- [5] FE Nr. 15.431/2006/HRB: Hohlraumreiches Asphaltträgerüst mit nachträglichem Verguss als schnelles Abdichtungssystem auf Brücken (HANV), Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, AG Bituminöse Stoffe und Abdichtungstechnik
- [6] FGSV Nr. 776: Hinweise für die Herstellung von Abdichtungssystemen aus Hohlraumreichen Asphaltträgerüsten mit Nachträglicher Verfüllung für Ingenieurbauten aus Beton - H HANV, Ausgabe 2015
- [7] DIN 18507:2012-08, Pflastersteine aus haufwerksporigem Beton – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen, Überwachung
- [8] DIN 50014: 1985-07, Climates and their technical application – Standard atmospheres
- [9] DIN EN 196-3: 2017-03: Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit
- [10] DIN 4126, 1986-08, Ortbeton Schlitzwände – Konstruktion und Ausführung
- [11] TP-BEL-EP: Technische Lieferbedingungen für Reaktionsharze für Grundierungen, Versiegelungen und Kratzspachtelungen unter Asphaltbelägen auf Beton, Ausgabe 1999
- [12] TP Asphalt-StB - Teil 5: Rohdichte von Asphalt, Ausgabe 2013
- [13] TP Asphalt-StB - Teil 6: Raumdichte von Asphalt-Probekörpern, Ausgabe 2012
- [14] TP Asphalt-StB - Teil 8: Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad, Ausgabe 2012
- [15] TP Asphalt-StB - Teil 28: Vorbereitung von Proben, Ausgabe 2007
- [16] TP Asphalt-StB - Teil 29: Maße von Asphalt-Probekörpern, Ausgabe 2007
- [17] TP Asphalt-StB - Teil 30: Herstellung von Marshall-Probekörpern mit dem Marshall-Verdichtungsgerät (MVG), Ausgabe 2007
- [18] TP Asphalt-StB - Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV), Ausgabe 2007
- [19] TP Asphalt-StB - Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Ausgabe 2013
- [20] FGSV Nr. 750: Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus Offenporigen Asphalt – M OPA, Ausgabe 2013
- [21] FGSV Nr. 729: Merkblatt für die Herstellung von Halbstarren Deckschichten – M HD, Ausgabe 2010

- 
- [22] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt – Berlin: Empfehlungen für ergänzende Standardleistungstexte für den Bau von Schutz- und Deck-schichten aus Gussasphalt auf Brücken in Verkehrsflächen der Bauklassen SV, I bis III (mit besonderen und zusätzlichen Beanspruchungen), erschienen am 31.05.2012
  - [23] Prüfbericht Nr. 1510171: Grundprüfung eines Verfüllbaustoffes entsprechend der H HANV, vom 30.05.2016 der ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH
  - [24] Prüfbericht Nr. 1504077: Grundprüfung eines Verfüllbaustoffes entsprechend der H HANV, vom 12.04.2016 der ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH
  - [25] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ – Eignungsbeurteilung von Deponieasphalt zur basis- und Oberflächenabdichtung von Deponien vom 01.12.2015
  - [26] Dr.-Ing. P. Renken: Substitution von Lösemitteln bei der Bestimmung der Rohdichte, erschienen in Bitumen 1/93
  - [27] Manuskript zum Expertengespräch – Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten, Bundesanstalt für Straßenwesen – Bergisch Gladbach, 19. Oktober 2005
  - [28] FE 15.473/2009/CRB: Effizienzsteigerung des Fahrbahnbelages auf Stahlbrücken und Schäden in Form von Rissen im Bereich von Anschlüssen am Deckblech (Kategorie-I-Schäden), Universität Duisburg – Essen – Institut für Metall- und Leichtbau und Institut für Straßenbau und Verkehrswesen
  - [29] Dipl.- Ing. J. Lindner: Erfahrung bei der Prüfung von Gußasphalt im Berliner Fahrbahndeckenbau, Berliner Bauwirtschaft Heft 21 , November 1971
  - [30] FE 15.431/2006/HRB; Hohlraumreiches Asphaltträgergerüst mit nachträglichem Verguss als schnelles Abdichtungssystem auf Brücken (HANV)
  - [31] DIN EN 14224, November 2010, Abdichtungsbahnen – Abdichtungssysteme für Betonbrücken und andere Verkehrsflächen aus Beton – Bestimmung der Rissüberbrückungsfähigkeit

## Bilder

- Bild 1: Betrachtung der Volumenanteile einer HANV-Schicht (ohne Berücksichtigung der stabilisierenden Zusätze) und dem Verhältnis Verfüllbaustoff / Bitumen nach der empfohlenen Zusammensetzung der H HANV [5].
- Bild 2: Korngrößenverteilungen der drei Grundmischgutsorten für ein ATG
- Bild 3: Veränderung des Hohlraumgehaltes bei unterschiedlichen Schlagzahlen
- Bild 4: Spannweiten der Hohlraumgehalt der hergestellten Asphalt-Probeplatten
- Bild 5: Gegenüberstellung der Hohlraumgehalte der Asphalt-Platten und der MPKs
- Bild 6: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen vor dem Bewertungshintergrund der DIN EN 18300-1
- Bild 7: Entwicklung der kryogenen Zugspannung bei Durchführung des Abkühlversuches nach TP Asphalt-StB Teil 46a (Volllinien: Mittelwerte; Strichlinien: Einzelwerte)
- Bild 8: Messsystem zur Ermittlung des Verarbeitungs- und Aushärtungsverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen
- Bild 9: Isotherme Reaktionskinetik der drei Verfüllbaustoffe bei einer Temperatur von 60 °C
- Bild 10: Isotherme Reaktionskinetik der drei Verfüllbaustoffe bei einer Temperatur von 23 °C
- Bild 11: Isotherme Reaktionskinetik der drei Verfüllbaustoffe bei einer Temperatur von 5 °C
- Bild 12: Exemplarische Veränderung der Reaktionskinetik des Verfüllbaustoffes A bei unterschiedlichen Temperaturen
- Bild 13: Beginn der Reaktionskinetik in Abhängigkeit von der Aushärtungstemperatur der Verfüllbaustoffe
- Bild 14: Zeit bis zum Erreichen einer äquivalenten Steifigkeit von 10.000 Pa in Abhängigkeit von der Aushärtungstemperatur der Verfüllbaustoffe
- Bild 15: Zeit bis zum Erreichen einer 95 % Endfestigkeit aller Verfüllbaustoffe
- Bild 16: Temperaturverlauf über die Abschnitte
- Bild 17: Reaktionskinetik bei Temperaturbeanspruchung nach 1 Stunde und einer Ausgangstemperatur von 23 °C, alle Verfüllbaustoffe
- Bild 18: Reaktionskinetik mit Temperaturbeanspruchung nach 1 Stunde bei einer Ausgangstemperatur von 60 °C, alle Verfüllbaustoffe
- Bild 19: Reaktionskinetik mit Temperaturbeanspruchung nach 2 Stunde bei einer Ausgangstemperatur von 60 °C, alle Verfüllbaustoffe
- Bild 20: Festkörpereinspannung - Solid-Rectangular-Fixture (SRF)
- Bild 21: Isochronen des Verfüllbaustoffes A nach unterschiedlichen Konditionierungen (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)
- Bild 22: Isochronen des Verfüllbaustoffes B nach unterschiedlichen Konditionierungen (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)
- Bild 23: Isochronen des Verfüllbaustoffes C nach unterschiedlichen Konditionierungen (Volllinien: kompl. Schermodul, Strichlinien: Phasenwinkel)
- Bild 24: Isochronen der Reaktionsharze nach einer Aushärtung von 7 Tagen bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit und Kennwerte eines polymermodifizierten Bitumens 25/55-55 A (Volllinien: ... kompl. Schermodul, Strichlinien: . Phasenwinkel)
- Bild 25: Äquisteifigkeitstemperatur mit zugehörigen Phasenwinkel bei einer Aushärtungstemperatur von 23 °C und 50 5 rel. LF – inkl. einem Straßenbaubitumen 50/70 und einem polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A zum Vergleich
- Bild 26: Schematische Darstellung der Bohrungen im Metallbecher
- Bild 27: Summenwahrscheinlichkeit der Masse jeder Kugel-Gruppe
- Bild 28: Verlauf der Oberflächentemperatur während der Aushärtung

- Bild 29: Ergebnisse des Kugelfallversuches
- Bild 30: Oberfläche der Prüfkörper nach 180 Minuten (links: Verfüllbaustoff A, rechts: Verfüllbaustoff C)
- Bild 31: Vollständig verfülltes ATG in Gipsschalung
- Bild 32: Ergebnisse der Verfüllbarkeit mit dem Verfüllbaustoff C bei unterschiedlichen Temperaturen, Plattendicken und Hohlraumgehalten vor dem empfohlenen Bereich des Hohlraumgehaltes nach HANV
- Bild 33: Volumetrische Zusammensetzung der HANV-Prüfkörper und Ausfüllungsgrad
- Bild 34: Biegeverhalten von Probekörpern mit unterschiedlichen Verfülltemperaturen und volumetrischen Kennwerten (Temperatur während des Verfüllens - Luft: Anteil der Luft in Vol.-%; RH: Anteil des Reaktionsharzes in Vol.-%; Luft + RH = Hohlraumgehalt des ATG)
- Bild 35: Abreißfestigkeit zur Betonunterlage (Prüf­temperatur 8 °C und 23 °C) bei einer Temperatur während des Verfüllens von 23 °C und 60 °C bei unterschiedlichen volumetrischen Kennwerten (Luft: Anteil der Luft in Vol.-%; RH: Anteil des Reaktionsharzes in Vol.-%; Luft + RH = Hohlraumgehalt des ATG)
- Bild 36: Schubfestigkeiten nach Wärmealterung bei einer Temperatur während des Verfüllens von 23 °C und 60 °C bei unterschiedlichen Hohlraumgehalten (Luft: Anteil der Luft in Vol.-%; RH: Anteil des Reaktionsharzes in Vol.-%; Luft + RH = Hohlraumgehalt des ATG)
- Bild 37: Abreißfestigkeit der geprüften Varianten nach 1 h Überarbeitung mit einer Asphaltzwischen­schicht aus Walzasphalt in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt des Asphaltträger­rüstes (1. Temperatur: Temperatur des ATG beim Verfüllen – Zeitspanne zwischen dem Beginn des Verfüllvorganges und der Überarbeitung mit einer Asphaltzwischen­schicht – 2. Temperatur: Prüf­temperatur der Abreißfestigkeit)
- Bild 39: Beanspruchung der DIN EN 14224 und der angepasste Abstufungen bei 1 Hz inkl. statischer Aufweitung zum Anfang
- Bild 40: Isochronen der Reaktionsharze A und C nach einer Aushärtung von 1 Tag bei 60 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit und bis zum 7. Tag bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte bei einer Prüffrequenz von 1 Hz (Voll­linien: kompl. Schermodul, Strich­linien: Phasenwinkel)
- Bild 41: Zug-, Abkühlversuch und resultierende Zugfestigkeitsreserve der Variante mit einem Hohlraumgehalt am ATG V von 16,8 Vol.-%
- Bild 42: Zug-, Abkühlversuch und resultierende Zugfestigkeitsreserve der Variante mit einem Hohlraumgehalt am ATG V von 26,3 Vol.-%
- Bild 43: Idealisierte Querschnittsskizze durch eine HANV-Schicht mit zufälliger Verteilung der Baustoffe und Baustoffgemische (Hbit = 27 Vol.-%, Ausfüllungsgrad des Reaktionsharzes = 95 %)
- Bild 44: Einfluss des Hohlraumgehaltes und der Schichtdicke des Asphaltträger­rüstes auf den Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz (bei einem kompl. Schermodul von 90 Pa)
- Bild 45: Einfluss des komplexen Schermoduls auf den Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz (bei einer Schichtdicke 2 cm)
- Bild 46: Relation zwischen dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff und der Wasseraufnahme im Vakuum
- Bild 47: Einfluss des Asphaltträger­rüstes und dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff auf die Abreißfestigkeit zur Betonunterlage (100 % = 1,2 MPa, 55 % = 0,7 MPa; Annahme: kompl. Schermodul von 150 MPa und ein Phasenwinkel von 23,5°)
- Bild 48: Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Abreißfestigkeit zur Betonunterlage (100 % = 2,9 MPa, 5 % = 0,2 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und ein Anteil der Luft von 0 Vol.-%)

- Bild 49: Einfluss des Asphaltträgergerüsts und dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff auf die Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-schicht/-deckschicht (100 % = 1,4 MPa, 75 % = 1,1 MPa; Annahme: kompl. Schermodul von 150 MPa und ein Phasenwinkel von 23,5° im ausgehärteten Zustand, kompl. Schermodul von 0,2 MPa und ein Phasenwinkel von 28,5° kurz vor der Überarbeitung)
- Bild 50: Einfluss des Vernetzungsgrades des Verfüllbaustoffes auf die Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-schicht/-deckschicht (100 % = 1,4 MPa, 25 % = 0,2 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Anteil der Luft von 0 Vol.-%, kompl. Schermodul von 150 MPa und einem Phasenwinkel von 23,5° im ausgehärteten Zustand)
- Bild 51: Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-schicht/-deckschicht (100 % = 3,7 MPa, 0 % = 0,0 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Anteil der Luft von 0 Vol.-%, kompl. Schermodul von 0,2 MPa und ein Phasenwinkel von 28,5° kurz vor der Überarbeitung)
- Bild 52: Einfluss des Hohlraumgehaltes des Asphaltträgergerüsts und des Ausfüllungsgrades mit dem Verfüllbaustoff auf die Biegezugfestigkeit (Annahmen: Bindemittelvolumen 12,5 Vol.-% und Gesteinsvolumen 65 Vol.-%)
- Bild 53: Einfluss des Bindemittel- und Gesteinsvolumens auf die Biegezugfestigkeit (Annahmen: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff 100 %)
- Bild 54: Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Biegezugfestigkeit (Annahmen: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff 100 %; Bindemittelvolumen 12,5 Vol.-% und Gesteinsvolumen 65 Vol.-%)
- Bild 55: Einfluss des Hohlraumgehaltes des Asphaltträgergerüsts und des Ausfüllungsgrades mit dem Verfüllbaustoff auf das E-Modul (Annahmen: Bindemittelvolumen 12,5 Vol.-% und Gesteinsvolumen 65 Vol.-%)
- Bild 56: Einfluss des Bindemittel- und Gesteinsvolumens auf das E-Modul (Annahmen: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff 100 %)
- Bild 57: Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf das E-Modul (Annahmen: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-%, Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff 100 %; Bindemittelvolumen 12,5 Vol.-% und Gesteinsvolumen 65 Vol.-%)
- Bild 58: Einfluss des Asphaltträgergerüsts und des Ausfüllungsgrades mit dem Verfüllbaustoff auf die Zugfestigkeit (100 % = 3,6 MPa, 43 % = 1,5 MPa, Annahme: kompl. Schermodul von 500 MPa und einem Phasenwinkel von 15°)
- Bild 59: Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die Zugfestigkeit (100 % = 4,9 MPa, 0 % = 0 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und Anteil der Luft von 0 Vol.-%)
- Bild 60: Einfluss des Asphaltträgergerüsts und dem Ausfüllungsgrad mit dem Verfüllbaustoff auf die kryogenen Spannungen (100 % = 0,3 MPa, 38 % = 0,1 MPa, Annahme: kompl. Schermodul von 500 MPa und einem Phasenwinkel von 15°)
- Bild 61: Einfluss der rheologischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes auf die kryogenen Spannungen (100 % = 5,3 MPa, 0 % = 0 MPa; Annahme: Hohlraumgehalt des ATG von 20 Vol.-% und Anteil der Luft von 0 Vol.-%)
- Bild 62: Normierte Darstellung der möglichen Einflüsse aus den Baustoffen und Baustoffgemischen auf die Kennwerte des HANV-Systems
- Bild 63: Verteilung der Biegezugfestigkeit von Gussasphaltprismen nach [29] (n = 390)

Bild 64: Verteilung des Elastizitätsmoduls von Gussasphaltprismen nach [29] (n = 390)

Bild 65: Halbquantitative Beurteilung der drei untersuchten Verfüllbaustoffe

## Tabellen

Tabelle 1: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse nach Tabelle 3 der H HANV

Tabelle 2: Messbedingungen der isothermen Reaktionskinetik

Tabelle 3: Messbedingungen bei Temperaturbeanspruchung während der Reaktionskinetik

Tabelle 4: Kombinationen der Konditionierung aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Tabelle 5: Messbedingungen der Festkörpereinspannung

Tabelle 6: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse nach Tabelle 4 der H HANV

Tabelle 7: Rissweiten der getesteten Beanspruchungsstufen

Tabelle 8: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Rissüberbrückungsfähigkeit bei -20 °C und 1 Hz

Tabelle 9: Zusammenfassung der Abkühl- und Zugfestigkeitsversuche

Tabelle 10: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse – Ausfüllungsgrad mit Reaktionsharz

Tabelle 11: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse – Abreißfestigkeit zur Betonunterlage

Tabelle 12: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse – Abreißfestigkeit zur Asphaltzwischen-/-deckschicht

Tabelle 13: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse – Biegezugfestigkeit der HANV-Schicht Biegezugfestigkeit

Tabelle 14: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse – Biegezugfestigkeit der HANV-Schicht – EModul

Tabelle 15: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse – Tieftemperaturverhalten der HANV-Schicht - Zugversuch

Tabelle 16: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse – Tieftemperaturverhalten der HANV-Schicht – Abkühlversuch

Tabelle 17: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse nach Tabelle 4 der H HANV und Gegenüberstellung mit den berechneten Ergebnissen

Tabelle 18: Veränderung des Elastizitätsmoduls infolge unterschiedlicher Reaktionsharze und Hohlraumgehalte des ATG bei einer Schichtdicke von 2 cm

Tabelle 19: Empfehlung für die Grundprüfung an der HANV-Schicht

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2017

**B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

**B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**

Mayer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

**B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**

Moormann, Buhmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brenberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2018

**B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

**B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Neumann, Brauer € 16,50

**B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2019

**B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2020

**B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

Paschen, Dürer, Gronau, Rentmeister  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit**

Maurer, Bettin  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke**

Keßler, Gehlen € 16,00

**B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze**

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken**

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens**

Kuhlmann, Stempniewski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

**B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern**

Friedrich € 9,00

**B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken**

Wirker, Donner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten**

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband**

€ 16,00

**B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags**

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems**

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 15,50

## 2021

### B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

### B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarne auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2022

### B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.