

**Fachveröffentlichung der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**bast**

Im Auftrag des Bundesministeriums  
für Verkehr und digitale Infrastruktur

Schlussbericht zum Forschungsprojekt  
FE 07.0245/2011/CGB

# **Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Asphalttragschichten auf mechanische Eigenschaften**

von

Axel Walther und Michael P. Wistuba

November 2014

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Straßenwesen (ISBS)  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael P. Wistuba

## Kurzfassung

Der Einsatz von aus alten Straßen rückgewonnenem Asphaltgranulat in Asphalttragschichten ist in Deutschland Stand der Technik. Aus zahlreichen Studien ist bekannt, dass die mechanischen Eigenschaften der Asphalttragschicht durch die Verwendung von Asphaltgranulat verändert werden. Zur Quantifizierung und Bewertung dieser Veränderung können Performance-Prüfungen herangezogen werden, bei denen im Labor unter definierten Prüfbedingungen das last-, temperatur- und zeitabhängige Materialverhalten von repräsentativen Probekörpern untersucht wird. So erhaltene Kennwerte der mechanischen Asphalteigenschaften finden zunehmend Eingang in die rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen, mit deren Hilfe die Lebensdauer der Straßenkonstruktion abgeschätzt wird.

Dieses Forschungsprojekt ist der Bestimmung der Einflüsse aus der Mischgutherstellung im Labor auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften von mit Asphaltgranulat modifiziertem Asphalttragschicht-Mischgut gewidmet.

Unter Variation der Herstellungsmodalitäten wurde untersucht, wie Asphalttragschicht-Mischgut mit Asphaltgranulat im Labor möglichst praxisnah hergestellt und daraus Probekörper gewonnen werden können, die vergleichende mechanische Eigenschaften aufweisen, wie das gleiche unter Praxisbedingungen in situ hergestellte und eingebaute Asphaltmischgut.

Im Projektverlauf wurden für 2 Varianten an Asphalttragschicht-Mischgut, nämlich

- Asphaltbeton der Sorte AC 32 T S mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen bei Warmzugabe (Referenz 50 M.-%) und
- Asphaltbeton der Sorte AC 32 T N mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen bei Kaltzugabe (Referenz 30 M.-%),

die Einflüsse auf die resultierenden Performance-Eigenschaften aus unterschiedlichen Labormischverfahren analysiert, nämlich

- Zweiwellen-Zwangsmischer (ZZM), Schlag-Rührmischer (SRM) und Gegenlauf-Zwangsmischer (GZM),
- unter Variation des Zugabeanteils von Asphaltgranulat von 0 bis 60 M.-% bei der Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) und
- unter Variation des Zugabeverfahrens bei Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N), nämlich Warm- und Kaltzugabe.

Die durchgeführten Performance-Prüfungen hinsichtlich Steifigkeit, Widerstand gegen Kälterissbildung, Ermüdungswiderstand und Verformungswiderstand bestätigen frühere Studien dahingehend, dass das Herstellverfahren im Labor die Performance-Eigenschaften von Asphalt signifikant beeinflusst.

Bei Wahl einer ausreichend langen Nachmischzeit von mindestens 180 Sekunden wurde nun der Nachweis erbracht, dass Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat im La-

bor möglichst praxisnah mittels Einsatzes eines Zweiwellen-Zwangsmischers oder alternativ mittels eines Gegenlauf-Zwangsmischers hergestellt werden kann (der Zweiwellen-Zwangsmischer ist gegenüber dem Gegenlauf-Zwangsmischer nach Möglichkeit vorzuziehen).

Mit Hilfe der im Projektbericht detailliert beschriebenen Vorgehensweise ist nach dem heutigen Stand des Wissens bestmöglich sichergestellt, dass die im Labor hergestellten Probekörper vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen, wie das gleiche unter Praxisbedingungen in situ hergestellte und eingebaute Asphaltmischgut.

## Abstract

The successful use of reclaimed asphalt in asphalt base course layers is state of the art in Germany. From numerous studies it is known that the mechanical properties of the asphalt base course are influenced by the use of reclaimed asphalt. To quantify and assess this change performance tests in laboratory are conducted. Specimens are tested under specified testing conditions concerning the load-, temperature- and time-dependent material behavior. The obtained characteristic values are increasingly used as input parameters in the mechanistic pavement design procedure in order to predict the service life time of the asphalt-pavement structure.

This research project is dedicated to the determination of the influences of the asphalt mixing process and the specimen preparation in laboratory on the resulting mechanical properties of modified asphalt base course mixtures using reclaimed asphalt.

By altering the asphalt mixing process in laboratory it is investigated how specimen are be obtained having the same mechanical properties as the same asphalt mix produced and built in situ.

For 2 different asphalt base course mixtures, i. e.

- asphalt concrete of the type AC 32 T S with differing amounts of reclaimed asphalt using warm feed procedure (reference 50 M.-% RAP) and
- asphalt concrete of the type AC 32 T N with differing amounts of reclaimed asphalt using cold feed procedure (reference 30 M.-% RAP),

the influences on the resulting performance properties due to different mixing procedures will be analyzed, using

- two-shaft compulsory mixer,
- planetary mixing and kneading machine and
- one-shaft compulsory mixer,
- and by variation of the amount of RAP from 0 to 60 M.-% for asphalt mixture AC 32 T S and
- of warm and cold feed procedure for asphalt mixture AC 32 T N.

The asphalt's mechanical properties are characterized by means of performance tests for determining stiffness, resistance to low temperature cracking, fatigue resistance and deformation resistance.

The results confirm previous studies that the mixing procedure significantly influences the performance properties of asphalt using reclaimed asphalt. A sufficient mixing time of at least 180 seconds is necessary that asphalt mixtures with reclaimed asphalt are satisfactorily produced in laboratory by using a two-shaft compulsory mixer or a one-shaft compulsory mixer. The two-shaft compulsory mixer is favored.

The asphalt mixing process in the laboratory is described in detail in the final report. With the help of the described procedure it is possible to prepare specimens in the laboratory that exhibit mechanical properties which are comparable to those of the same asphalt mix produced and built under practical conditions in situ.

# Effects of reclaimed asphalt on the mechanical properties of asphalt base course layers

## 1 Aim of the project

The reuse of reclaimed asphalt in hot mixed asphalt (HMA) for asphalt base course layers is current state of technology in Germany. From numerous studies it is known that the mechanical properties of asphalt can be changed by reclaimed asphalt pavements (RAP). However it is largely unknown to what extent the mechanical properties are affected by the manufacturing process (mixing, placing and compacting).

The aim of the project is to detect an asphalt mixing procedure in laboratory using reclaimed asphalt where specimen can be obtained which show comparative mechanical properties, such as the same asphalt mix produced and built in under in situ conditions. The manufacturing procedures under laboratory conditions need to be defined in order to predict the service life time of the asphalt-pavement structure applying the German mechanistic pavement design procedure (RDO Asphalt 09).

Furthermore, the research project is dedicated to determine the influence of the specimen preparation in laboratory on the resulting mechanical properties of modified asphalt base course mixtures with reclaimed asphalt.

Finally, the laboratory mixing process is to be worked out, which results in the greatest practical use in terms of the resulting properties.

## 2 Research Approach

To achieve the project's objective, the laboratory asphalt mixing process by using reclaimed asphalt is focused on. At ISBS it is known from numerous previous studies that using reclaimed asphalt in the mixing process shows significant effects on the mechanical properties of the HMA. Therefore, the mechanical properties of asphalt with reclaimed asphalt depend on the mixing kinetics of the used laboratory mixing procedure. An equivalence of different mixing procedures has not been scientifically proven yet and is, therefore, a further objective.

For 2 different asphalt base course mixtures, i. e.

- asphalt concrete of the type AC 32 T S with differing amounts of reclaimed asphalt by using warm feed procedure (reference 50 M.-% RAP) and
- asphalt concrete of the type AC 32 T N with differing amounts of reclaimed asphalt by using cold feed procedure (reference 30 M.-% RAP),

the influences on the resulting performance properties due to different mixing procedures will be analyzed, using

- two-shaft compulsory mixer (ZZM),
- planetary mixing and kneading machine (SRM) and
- one-shaft compulsory mixer (GZM),
- variation of the amount of RAP from 0 to 60 M.-% for asphalt mixture AC 32 T S and
- variation of warm and cold feed procedure for asphalt mixture AC 32 T N.

In addition, the respective HMA-type itself and its individual components as aggregates including filler, RAP and fresh binder are obtained from the asphalt plant and then mixed in laboratory under variation of the above mentioned conditions (according to control test results). Furthermore, cores from each HMA type (AC 32 T S and AC 32 T N) are gathered in situ. Specimens are prepared and laboratory tests are performed to characterize the mechanical properties of the HMA.

Taking into account different production methods (laboratory, mixing plant, and construction site) and varying amounts and feed of RAP with sufficient mixing time, the asphalt's mechanical properties are characterized by means of performance tests to determining stiffness, resistance to low temperature cracking, fatigue resistance and deformation resistance.

The results obtained on the laboratory samples are compared with the results from samples generated from the respective HMA-types compacted in laboratory and those taken from the road in form of core samples. Further comparative studies are carried out using mechanistic pavement design (based on linear-elastic multi-layer theory) according to German regulations (RDO Asphalt 09).

### 3 Test results

#### 3.1 Composition of the HMA-types (AC 32 T S)

The grading of each HMA-variation AC 32 T S is shown in Table 3-1. The asphalt base type (MA) from the industrially produced asphalt mixing plant serves as reference for the composition.

**Table 3-1: Grading of HMA-types AC 32 T S with warm feed RAP (average values)**

Sieve Sizes [mm]	Percentage Passing [M.-%]												
	0 M.-% RAP			40 M.-% RAP			50 M.-% RAP				60 M.-% RAP		
	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM	MA	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM
31,5	98,5	100	100	99,9	99,9	100	99,1	99,5	96,8	96,9	99,3	99,0	98,5
22,4	86,7	85,0	87,9	86,9	85,0	91,0	86,2	86,7	84,8	83,4	85,9	84,7	87,2
16	77,3	75,5	82,4	77,4	78,1	83,0	77,5	78,2	77,5	77,2	78,3	77,5	78,0
11,2	66,1	65,7	73,9	68,2	68,4	72,7	67,6	67,1	68,3	67,9	67,7	67,8	65,5
8	54,9	55,1	64,4	59,2	59,6	63,9	58,7	57,1	58,7	58,7	58,0	58,4	54,7
5,6	47,0	46,0	53,2	49,0	49,3	53,5	48,2	46,3	47,8	48,5	47,4	47,6	43,3
2	33,7	33,5	38,5	35,0	35,8	38,3	35,5	32,2	34,3	35,0	33,3	33,6	30,5
1	27,2	26,2	30,6	28,2	28,5	30,6	27,6	26,2	27,4	27,8	27,0	26,5	24,6
0,25	12,6	11,8	13,0	15,5	14,6	16,0	13,5	14,8	14,6	15,2	15,8	14,4	13,7
0,125	8,9	8,2	9,1	11,9	11,1	12,4	9,7	11,4	11,3	11,7	12,3	10,9	10,2
0,063	7,0	6,5	7,2	9,9	9,3	10,4	7,8	9,5	9,2	9,8	10,3	8,9	7,6

ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine

Figure 3-1 shows the desired and achieved particle size distributions for the asphalt base course types AC 32 T S with 50 M.-% RAP compared to the tolerances according to European Standards (DIN EN 13108).

The obtained particle size distributions approximately correspond to the desired grading chart of the industrially produced asphalt base type (MA).

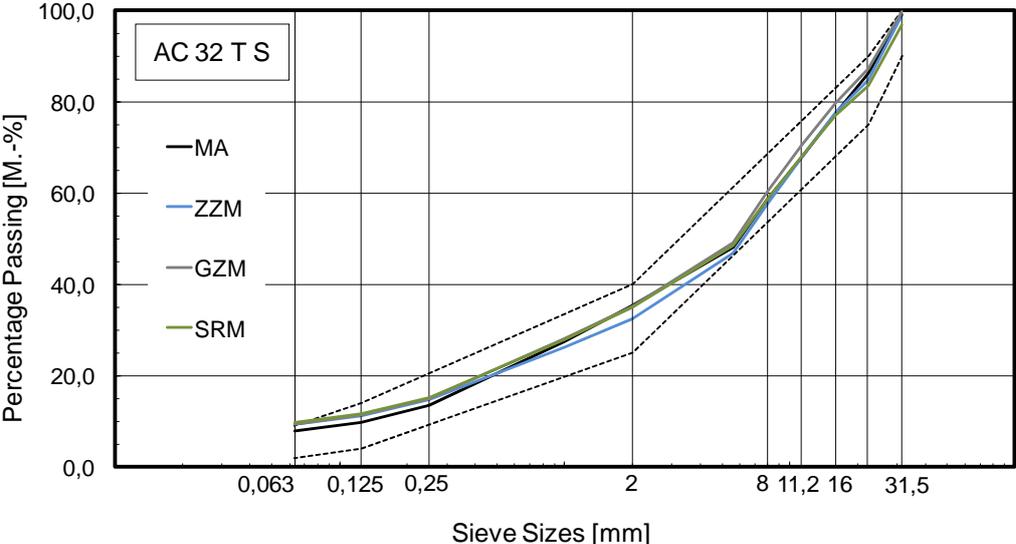


Figure 3-1. Average particle size distribution (control tests) for HMA types (AC 32 T S) with 50 M.-% RAP (MA: industrially produced asphalt; ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine).

Table 3-2 summarizes the control test results of the HMA types AC 32 T S.

Table 3-2: Control test results of the asphalt mix types AC 32 T S (average values)

	0 M.-% RAP			40 M.-% RAP			50 M.-% RAP				60 M.-% RAP		
	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM	MA	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM
Binder content B [M.-%]	4,3	4,4	4,7	4,4	4,4	4,8	4,3	4,4	4,4	4,5	4,4	4,4	4,4
Raw density $\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,537	2,549	2,530	2,568	2,557	2,550	2,565	2,578	2,561	2,560	2,581	2,578	2,580
Softening Point $SP_{R\&B}$ [°C]	59,6	62,2	58,6	59,8	60,0	59,6	61,6	60,2	60,2	59,8	62,0	61,2	63,4

ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine

For control test results of the HMA types AC 32 T N see Final Report.

### 3.2 Deformation Resistance of Asphalt

The results from cyclic penetration tests with unknowing confining pressure according to German test specification (TP Asphalt, part 25 A 2) for the mix types AC 32 T S are indicated in Table-3.

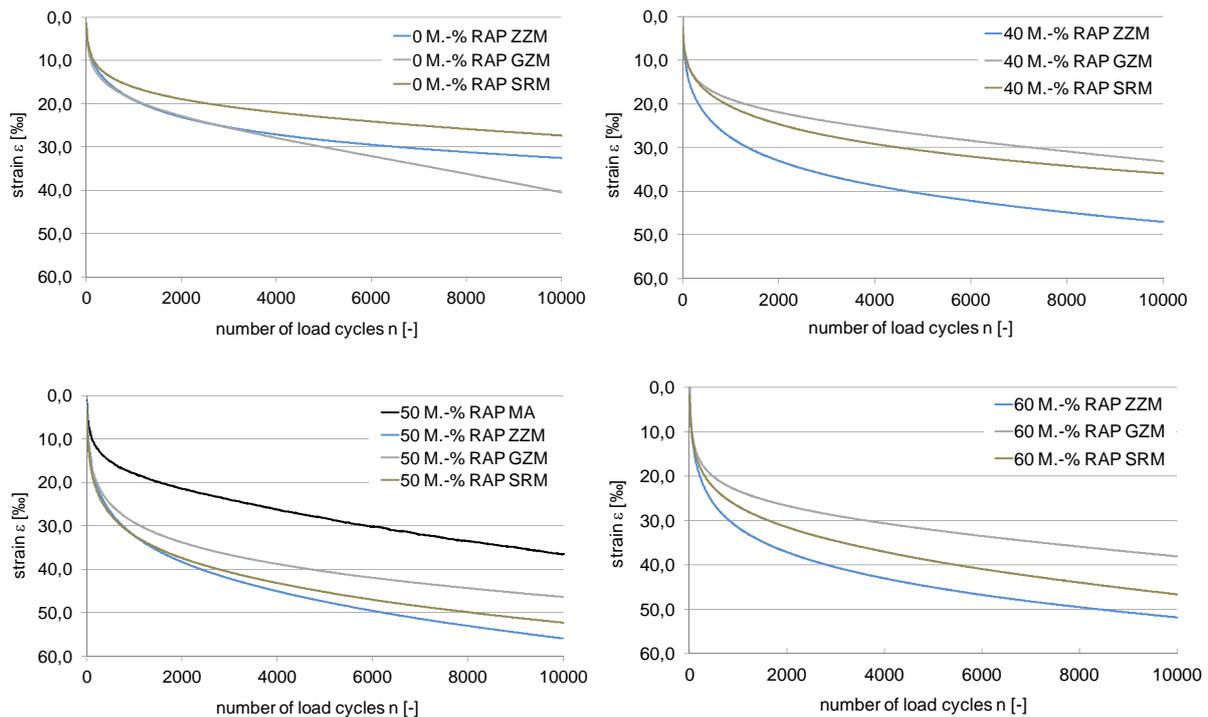
**Table 3-3: Results from cyclic penetration tests with unknowing confining pressure according to German test specification (TP Asphalt, part 25 A 2) for the mix types AC TS 32 (average values)**

RAP Content [M.-%]	Mixer-type	Number of load cycles [-]	Accumulated plastic strain [‰]	Accumulated plastic deformation [mm]	Strain rate [‰ · 10 <sup>-4</sup> /n]
0	ZZM	10000	32,54	2,73	10,83
	GZM	9166	38,30	3,28	20,63
	SRM	10000	27,35	2,31	7,39
40	ZZM	10000	47,04	3,87	10,37
	GZM	10000	33,63	33,17	2,86
	SRM	10000	35,95	3,05	11,74
50	MA	10000	36,98	3,11	17,15
	ZZM	10000	56,06	4,65	14,94
	GZM	10000	46,92	3,96	12,04
	SRM	10000	52,30	53,68	4,37
60	ZZM	10000	51,79	4,25	17,02
	GZM	10000	42,95	3,63	10,90
	SRM	10000	46,61	3,87	17,62

ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine; MA: industrially produced asphalt

Figure 3-2 shows the mean curves of accumulated permanent strain obtained by varying the amounts of RAP and the laboratory mixing procedures. It should be noted that the asphalt types AC 32 T S produced by the one-shaft compulsory mixer (GZM) tend to exhibit a better resistance to permanent deformation compared to other laboratory mixing procedures (see Figure 3-2).

When using 50 M.-% RAP the industrially produced asphalt (MA) exhibits the best resistance to deformation.

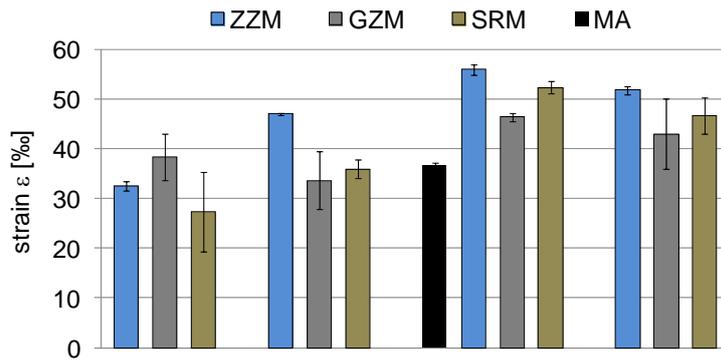


**Figure 3-2. Mean curves of accumulated permanent strain from cyclic penetration test with unknowing confining pressure according to German test specification (TP Asphalt, part 25 A 2) for the mix types AC 32 T S by varying the amounts of RAP and the laboratory mixing procedures (MA: industrially produced asphalt; ZMZ: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine).**

Figure 3-2 shows no uniform ranking of the laboratory mixing procedures in terms of resistance to permanent deformation. Due to the German test specifications (TP Asphalt, Teil 25 A 2) the results of two specimen at the end of the test are reported by specifying the resulting plastic strains  $\varepsilon$  [%] and the accumulated permanent deformations [mm].

Figure 3-3 shows the average strain and its range. Small ranges are deserved for the two-shaft compulsory mixer. This indicates a repeatable, uniform mixing process, which is accomplished by other laboratory mixing procedures with less reliability.

The results from the cyclic penetration test with unknowing confining pressure according to German test specification (TP Asphalt, part 25 A 2) for the mix types AC 32 T N are described in the final report.



**Figure 3-3. Permanent strain stated at end of cyclic penetration test with unknown confining pressure according to German test specification (TP Asphalt, part 25 A 2) for the mix types AC 32 T S by varying the amounts of RAP and the laboratory mixing procedures (MA: industrially produced asphalt; ZMZ: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine).**

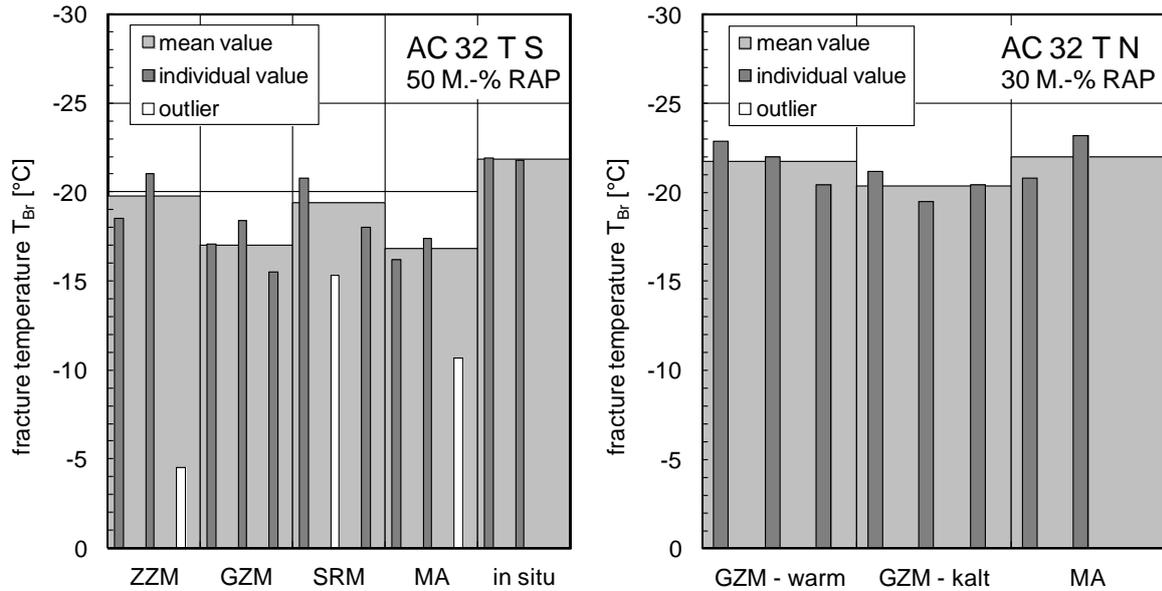
### 3.3 Resistance to low temperature cracking

Resistance to low temperature cracking is assessed by means of Uniaxial Tension Stress Test (UTST) and Thermal Stress Restrained Specimen Tests (TSRST) and the following parameters are identified:

- fracture temperature  $T_{Br}$  from TSRST
- tensile strength reserve  $\Delta\beta_z(T)$  at defined temperature  $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ .

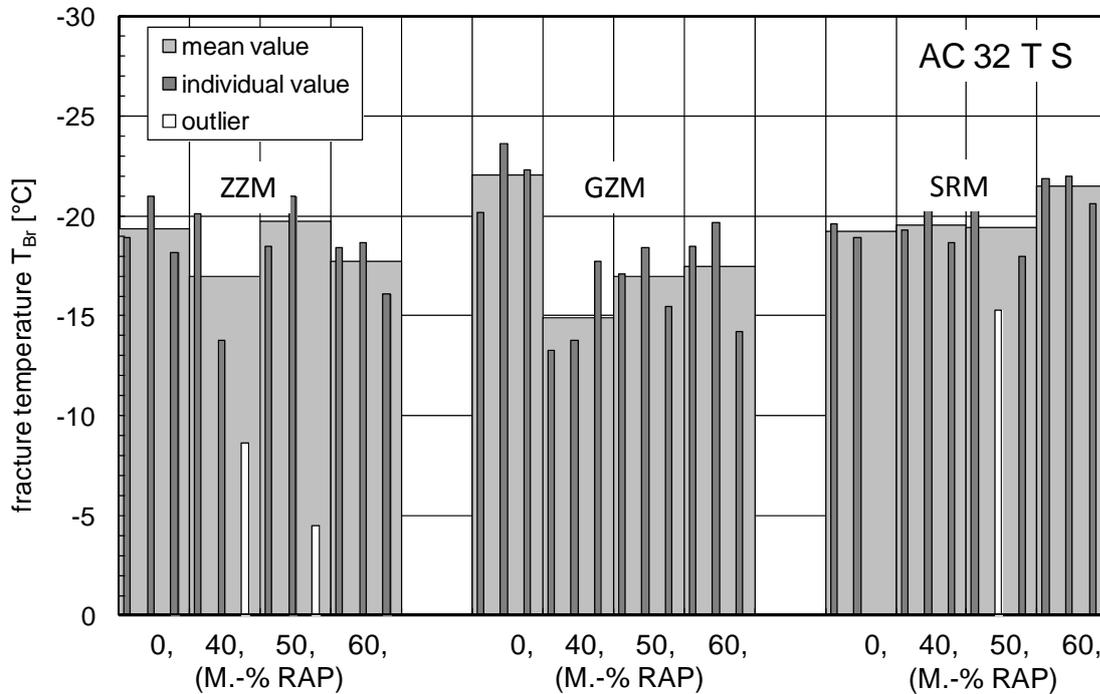
In the following figures the various AC 32 T S and AC 32 T N mix variants (with RAP amounts of 50 M.-% and 30 M.-%) are comparatively analyzed based on individual values, mean values and statistical outliers.

There are clear differences in the fracture temperatures within one type of mix. While the results for the asphalt type AC 32 T N with 30 M.-% RAP content vary slightly, the fracture temperatures for asphalt type AC 32 T S with 50 M.-% RAP content show differences of up to 4.1 Kelvin (see Figure 3-4, left).



**Figure 3-4. Comparison of the fracture temperatures for AC 32 TS with 50 M.-% RAP (left) and for AC 32 TN with 30 M.-% RAP (right), by varying the laboratory mixing procedure (MA: industrially produced asphalt; ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine).**

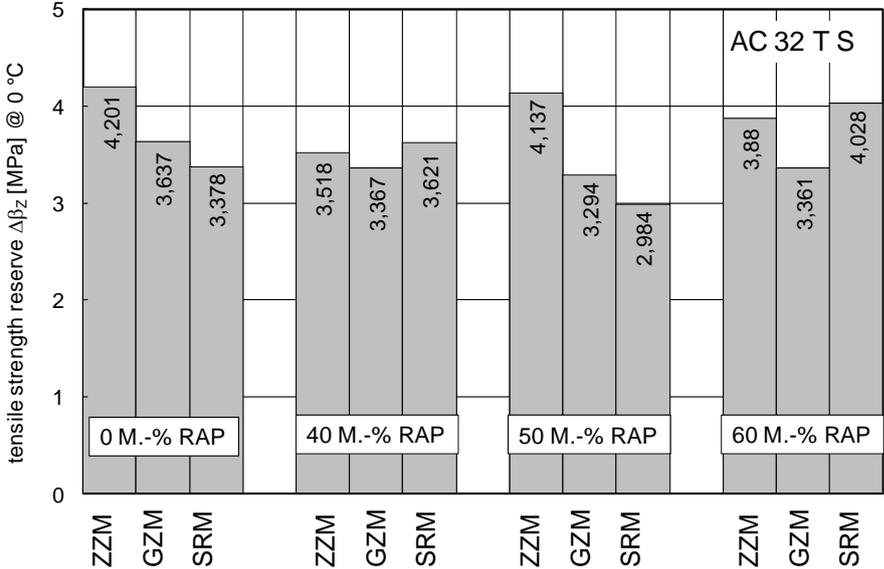
In Figure 3-5 the fracture temperatures for AC 32 T S are shown for different amounts of RAP and laboratory mixing procedures. The influence on the fracture temperature is not systematic.



**Figure 3-5. Comparison of the fracture temperatures for AC 32 T S by varying the amounts of RAP and the laboratory mixing procedures (ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine).**

The tensile strength reserve is evaluated for a reference temperature of  $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ . At this temperature, the same ranking of the tensile strength reserve is observed for AC 32 T S as well as for AC 32 T N.

In Figure 3-6 the tensile strength reserve is shown for AC 32 T S.



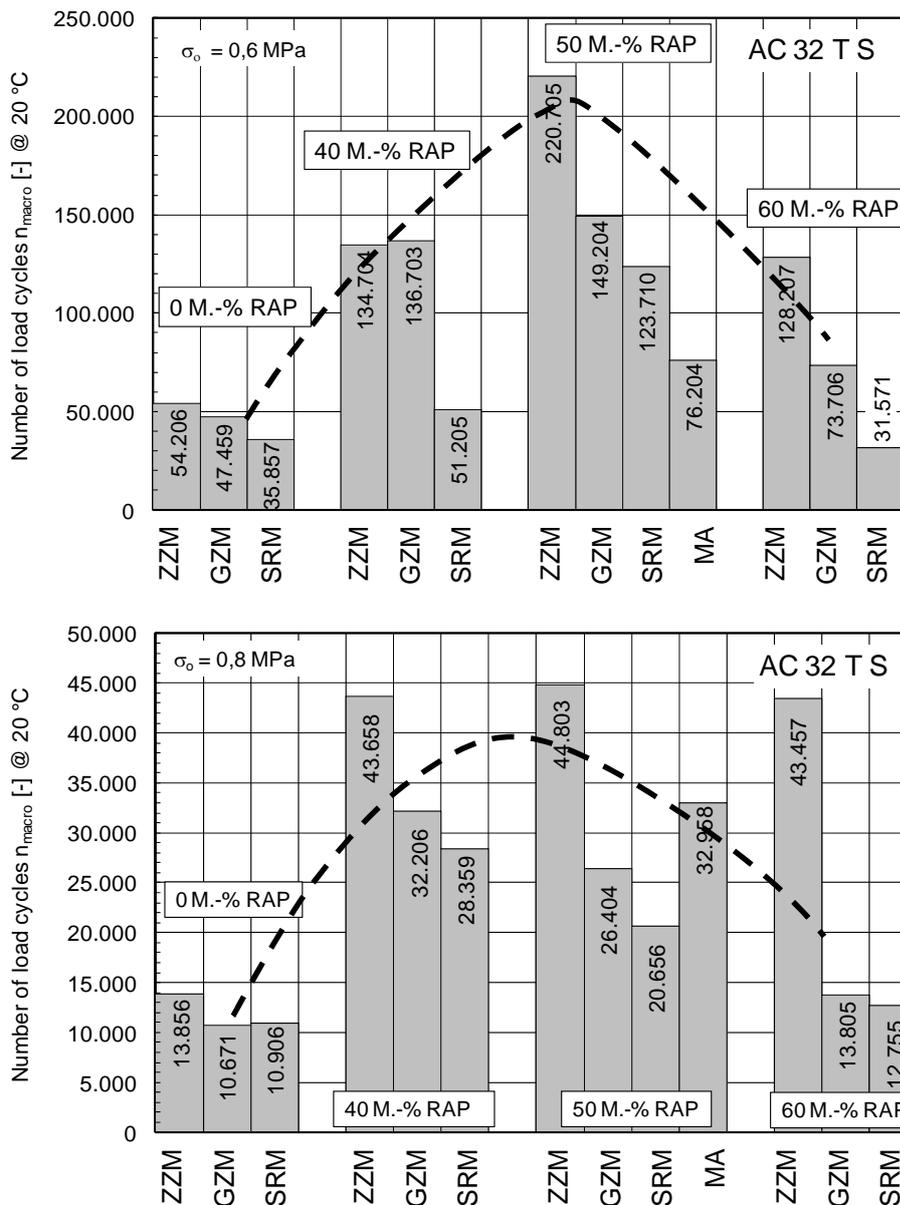
**Figure 3-6. Tensile stress reserve for AC 32 T S by varying the amounts of RAP and the laboratory mixing procedure (ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine).**

### 3.4 Fatigue resistance

As to AC 32 T S, Figure 3-7 shows the number of load cycles until failure stated in Uniaxial Cyclic Tension Stress Tests (UCTST) at a temperature of  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  and at two different stress levels.

The amount of RAP influences the fatigue resistance significantly. Stiff asphalt mix types result in small strains during the fatigue test. With an amount of 50 M.-% RAP and a selected stress level of  $\sigma_0$  0.6 MPa good fatigue properties are obtained for all laboratory mixing procedures (see Figure 3-7, top).

An amount of 40 M.-% RAP result in the highest numbers of load cycles by increasing the stress level from  $\sigma_0 = 0.6 \text{ MPa}$  to  $0.8 \text{ MPa}$  (Figure 7-3, bottom). Noticeable is the coherence between the amount of RAP and the determined number of load cycles in the asphalt mix types from the laboratory mixing procedures one-shaft compulsory mixer (GZM) and the planetary mixing and kneading machine (SRM). Those laboratory mixing procedures exhibit a consistently reproducible context in terms of fatigue properties.



**Figure 3-7. Number of load cycles until failure for AC 32 TS from Uniaxial Cyclic Tension Stress Tests (UCTST) at a temperature of +20 °C and at two different stress levels;  $\sigma_0$  of 0.6 MPa (top) and 0.8 MPa (below), by varying the amounts of RAP and the laboratory mixing procedures (MA: industrially produced asphalt; ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine).**

## 4 Implications for practice

The performance characteristics of HMA using reclaimed asphalt (RAP) are significantly affected by the manufacturing process. This is also confirmed by the work carried out in this project where performance tests are used to assess stiffness properties, resistance to cold cracking, fatigue resistance and deformation resistance were comparatively performed on both, laboratory asphalt mixes and industrially produced asphalt mixes, as well as core samples from the road.

The influences of different laboratory mixing procedures on the resulting performance characteristics of asphalt were investigated. Therefore 2 HMA types for asphalt base course layers with varying amounts and feed procedures of RAP were reproduced in laboratory by the following laboratory mixing procedures: ZZM: two-shaft compulsory mixer; GZM: one-shaft compulsory mixer; SRM: planetary mixing and kneading machine. Based on the study results, the following conclusions can be drawn:

- Comparative studies on **resistance to low temperature cracking** (evaluating fracture temperature and tensile stress reserve) and **deformation resistance** of asphalt mixtures with RAP (evaluating the accumulated permanent strain from cyclic penetration test with unknowing confining pressure) show that
  - with increasing amounts of RAP (from 0 to 60 M.-%), the resulting performance characteristics tend to be significantly influenced and the determination of the optimal recipe is an optimization process,
  - the choice of the laboratory mixing device exhibits minor importance and two-shaft compulsory mixer (ZZM), one-shaft compulsory mixer (GZM) or planetary mixing and kneading machine (SRM) can either be used,
  - the investigated methods adding RAP (warm or cold feed), exhibit no significant affect on the resistance to low temperature cracking.
- Investigations on **fatigue resistance** of asphalt mixture with RAP (evaluating the number of load cycles from UCTST at a test temperature of 20 °C) show that
  - independently from the laboratory mixing procedure and the process of adding RAP the determined fatigue behavior is advantageously influenced,
  - the fatigue behavior cannot satisfactorily be determined using a planetary mixing and kneading machine (SRM), therefore the application of this mixer type for the production of bituminous specimens for performance tests is not recommended.
- Analysis of the theoretical **service lifetime** of the pavement structure using mechanistic pavement design procedure show that
  - the choice of the laboratory mixing device is of minor importance so that two-shaft compulsory mixer (ZZM) or one-shaft compulsory mixer (GZM) can either be recommended; the application of the planetary mixing and kneading machine (SRM) for the production of bituminous specimens for fatigue tests is not recommended, since the fatigue behavior cannot satisfactorily be determined,
  - the investigated methods for adding RAP (warm or cold feed), show significantly effect on the service lifetime at high RAP amounts only.

By choosing a sufficient mixing time of at least 180 seconds it can be stated that asphalt mixtures with RAP can be satisfactorily produced in laboratory by using a two-shaft compulsory mixer or a one-shaft compulsory mixer. The two-shaft compulsory mixer is favored.

The procedure for mixing asphalt in the laboratory is described in detail in the final report. With the help of the described procedure it is possible to prepare specimens in the laboratory that exhibit mechanical properties which are comparable to those of the same asphalt mix produced and built under practical conditions in situ.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorwort.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung.....</b>	<b>5</b>
2.1	Problemstellung	5
2.2	Forschungsziel	6
<b>3</b>	<b>Untersuchungsmethodik.....</b>	<b>7</b>
3.1	Vorgehensweise	7
3.2	Verwendete Baustoffe und Rezepturen	10
3.2.1	Gestein.....	10
3.2.2	Bitumen.....	10
3.2.3	Ausbauasphalt in Form von Asphaltgranulat.....	11
3.2.4	Asphaltmischgut.....	11
3.3	Laborverfahren zur Herstellung von Asphaltmischgut	12
3.3.1	Zweiwellen-Zwangsmischer (ZZM).....	15
3.3.2	Gegenlauf-Zwangsmischer (GZM).....	16
3.3.3	Schlag- und Rührmischer (SRM).....	17
3.3.4	Walzsektor-Verdichtung zur Herstellung von Asphalt-Probepplatten....	18
3.4	Performance-Prüfungen zur Ansprache der Asphalteeigenschaften	20
3.4.1	Verformungsverhalten.....	20
3.4.2	Kälteverhalten.....	24
3.4.3	Ermüdungsverhalten.....	26
3.4.4	Komplexer dynamischer E-Modul.....	30
3.5	Laborprüfungen zur Ansprache der Bitumeneigenschaften	34
3.5.1	Biegebalkenrheometrie (BBR-Analytik).....	34
3.5.2	Oszillationsmessung im Dynamischen Scherrheometer (DSR-Analytik)	34
3.5.3	Kriech- und Relaxationsverhalten im Multiple Stress Creep and Recovery Test.....	35
3.6	Rechnerische Lebensdauer	37
3.6.1	Berechnungsgrundlagen.....	37
3.6.2	Anzahl der zulässigen Lastwechsel.....	38
3.6.3	Nachweis der Gebrauchsdauer.....	39

<b>4</b>	<b>Untersuchungsergebnisse .....</b>	<b>39</b>
4.1	Asphaltmischguteigenschaften	39
4.1.1	Zusammensetzung der Mischgut-Varianten.....	39
4.1.2	Gebrauchsverhaltensorientierte Eigenschaften.....	43
4.2	Bindemittleigenschaften	78
4.2.1	Kenngößen der Frischbindemittel .....	78
4.2.2	Kenngößen der rückgewonnen Bindemittel .....	79
4.3	Lebensdauerprognose mittels rechnerischer Dimensionierung	83
4.3.1	Randbedingungen und Eingangsgrößen.....	83
4.3.2	Berechnungsergebnisse .....	86
<b>5</b>	<b>Interpretation der Untersuchungsergebnisse .....</b>	<b>91</b>
5.1	Kälteverhalten	91
5.2	Verformungsverhalten	95
5.3	Ermüdungsverhalten	96
5.4	Rechnerische Dimensionierung	98
<b>6</b>	<b>Laborverfahren zur Herstellung von Asphalt-Probekörpern für Performance-Prüfungen unter Verwendung von Asphaltgranulat.....</b>	<b>101</b>
6.1	Mischgutherstellung im Labor	101
6.1.1	Wahl der Mischtemperatur .....	101
6.1.2	Wahl der Temperatur der frischen Gesteinskörnung zur Gewährleistung der Mischtemperatur bei Zugabe von Asphaltgranulat .....	102
6.1.3	Ablauf bei der Mischgutherstellung .....	104
6.2	Vorgehensweise zum Einstellen eines definierten Wassergehaltes des Asphaltgranulats bei der Kaltzugabe	106
6.3	Herstellung von Asphalt-Probepplatten	107
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>108</b>
7.1	Projektziel und Untersuchungsmethodik	108
7.2	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	109
	<b>Literatur .....</b>	<b>112</b>

## **1 Vorwort**

In diesem Forschungsprojekt werden neue Erkenntnisse zur Herstellung von Asphalt im Labor unter Verwendung von Asphaltgranulat vorgestellt. Projektziel war die Definition eines praxisnahen Verfahrens der Mischgutherstellung zur Gewinnung von Probekörpern für Performance-Prüfungen, die aus mit Asphaltgranulat modifiziertem Asphaltmischgut bestehen und vergleichende mechanische Eigenschaften aufweisen, wie das gleiche unter Praxisbedingungen in situ hergestellte und eingebaute Asphaltmischgut. Dabei wurden mögliche Einflüsse von Schwankungen im Zugabeanteil des Asphaltgranulates sowie des Zugabeverfahrens analysiert.

Dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur und der Bundesanstalt für Straßenwesen sei für die Realisierung dieses Projekts herzlich gedankt. Langfristig ausreichende Investitionen in die universitäre Forschung sind die Voraussetzung, eine aus der Forschung erwachsende Wertschöpfung für die Gesellschaft sicherzustellen.

Gleichermaßen wird Hastrabau-Wegener GmbH & Co. KG, KEMNA BAU Andreae GmbH & Co. KG und TOTAL Deutschland GmbH für die Bereitstellung von Baustoffen gedankt. Dem Geschäftsbereich Wolfenbüttel der niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr und der Stadt Braunschweig sei gedankt für die Möglichkeit, Bohrkerne aus Straßen zu entnehmen.

Die Autoren

## **2 Einleitung und Zielsetzung**

### **2.1 Problemstellung**

Recycling von Straßenbaustoffen erfolgt in Deutschland im internationalen Vergleich auf hohem Niveau. Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Form von Asphaltgranulat ist Stand der Technik und im Technischen Regelwerk in Form von Anforderungen, Bau- und Einsatzkriterien umfangreich dokumentiert, beispielsweise in den Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (FGSV, 2009d) und im Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (FGSV, 2009b).

Der Einsatz von Asphaltgranulat zur Herstellung von neuen Asphalttschichten wurde in den vergangenen 20 Jahren für Asphalttragschichten und in den letzten 10 Jahren auch für Asphaltbinderschichten umgesetzt. Dies hat sich in der Praxis gut bewährt, Forschungsbedarf wurde hier nicht mehr gesehen.

Um die Wiederverwendung auf höchstem Wertschöpfungsniveau voranzutreiben, haben sich die wissenschaftlichen Untersuchungen in der jüngeren Vergangenheit auf die Wiederverwendung von Asphaltgranulat in Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten konzentriert. Dabei wurde gezeigt, dass Asphaltgranulat unter bestimmten Voraussetzungen in Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten in hohen Zugabeanteilen wiederverwendet werden kann, ohne dabei die Gebrauchseigenschaften des Asphalts nachteilig zu beeinflussen.

Am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig (ISBS) wurde die Möglichkeit des Einsatzes von Asphaltgranulat aus dichten Asphaltdeckschichten und Asphaltbinderschichten in Asphaltdeckschichten (Renken und Lobach, 2005), wie auch für Ausbauasphalt aus Offenporigem Asphalt in Asphaltbinder und Splittmastixasphalt nachgewiesen (Grönniger et al. 2009). Zum Einfluss von Asphaltgranulat mit Straßenbaubitumen auf Asphaltmischgut mit Polymermodifizierten Bindemitteln zeigten Renken und Lobach (2006), dass vorteilhafte Asphalteeigenschaften (insbesondere gute Kälteflexibilität und Ermüdungseigenschaften) durch die Zugabe von Asphaltgranulat mit Straßenbaubitumen grundsätzlich erhalten bleiben und teilweise günstig beeinflusst werden. In der Fachwelt werden die vorteilhaften Wirkungen des Asphaltgranulats zum Teil mit einem Doppelumhüllungseffekt begründet, nach dem das Bindemittel des Asphaltgranulats während des Mischprozesses nicht vollständig aufgeschmolzen wird und durch das im Regelfall frische weichere Zugabebindemittel umhüllt wird. Weitere Untersuchungen dazu laufen.

Die Grundlagen zum Nachweis der Wirkung von Recyclingbaustoffen in Asphaltmischgut stützen sich zu einem großen Teil auf gebrauchsvorhaltensorientierte Laborprüfungen (Performance-Prüfungen). Auch wenn die Ergebnisse aus Laborstudien anhand von Versuchsstrecken validiert werden, bleibt stets eine gewisse Unsicherheit in der Aussagekraft von Laborprüfungen bestehen, weil die Prüfbedingungen die reale Beanspruchungssituation nicht exakt widerspiegeln. So müssen Forschungsergebnisse im Labormaßstab nicht zwingend in gleicher Weise für reale

Misch- und Einbaubedingungen gelten. In der Praxis wurden beispielweise Hohlraumgehaltsabweichungen zu den in der Erstprüfung ermittelten Hohlraumgehalten einer Asphalttragschicht mit Ausbauasphalt festgestellt. Der Hohlraumgehalt in situ ist oft erheblich kleiner als der in der Erstprüfung ermittelte. Ferner wurden teilweise erhebliche Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften der Asphalttragschicht festgestellt, je nachdem, ob die Prüfung an Bohrkernproben aus der Straße oder an im Labor hergestellten Probekörpern vorgenommen wurde.

Es ist zurzeit weitgehend ungeklärt, in welchem Ausmaß welche Einflussparameter bei der Laborherstellung des Asphaltmischguts mit Asphaltgranulat die resultierenden mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Beispielsweise bleiben die Art der Zugabe (kalt oder warm) oder auch der Wassergehalt des Asphaltgranulats heute unberücksichtigt.

Insbesondere seit der Einführung der RDO Asphalt im Jahr 2010 (Richtlinien zur rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht; FGSV, 2010) wird der Vergleichbarkeit von Labor und Praxis eine besondere Bedeutung beigemessen, weil bei der rechnerischen Dimensionierung und Beurteilung der Nutzungsdauer einer Asphaltbefestigung über die Ermüdungseigenschaften und die Steifigkeit der Asphalttragschicht direkt an die Laborergebnisse mit der zulässigen Zahl an Verkehrsüberrollungen gekoppelt wird. Damit ist ein besseres Grundlagenverständnis um die Einflüsse der Probekörperherstellung im Labor – insbesondere bei der Verwendung von Asphaltgranulat – auf die in Performance-Prüfungen festgestellten mechanischen Eigenschaften unverzichtbar geworden.

## **2.2 Forschungsziel**

Ziel des Projekts ist die Klärung der Frage, wie im Labor Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat möglichst praxisnah hergestellt und daraus Probekörper gewonnen werden können, die vergleichende mechanische Eigenschaften aufweisen, wie das gleiche unter Praxisbedingungen in situ hergestellte und eingebaute Asphaltmischgut. Es sind die Herstellungsmodalitäten unter Laborbedingungen zu präzisieren, um im Rahmen einer „erweiterten“ Erstprüfung auf Grundlage der RDO Asphalt die Nutzungsdauer der Asphaltkonstruktion bestmöglich prognostizieren zu können. Der Einfluss von möglichen Schwankungen in der Asphaltgranulatqualität ist dabei zu berücksichtigen.

### 3 Untersuchungsmethodik

#### 3.1 Vorgehensweise

Am ISBS ist aus zahlreichen früheren Untersuchungen zur praxisadäquaten Laborverdichtung von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat bekannt, dass die Intensität des Aufschlusses eines Granulatstückes die mechanischen Eigenschaften des Asphaltes maßgeblich beeinflussen kann und der Aufschluss des Granulatstückes von der Art des Mischwerkzeuges abhängig ist. Daher sind dem Labormisch- und -verdichtungsprozess von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat eine besondere Bedeutung beizumessen.

Die Asphaltherstellung unter Zugabe von Asphaltgranulat erfolgt im Labor des ISBS vorzugsweise mit einem Zweiwellen-Zwangsmischer mit einer ausreichend langen Mischzeit. Der Zweiwellen-Zwangsmischer ist eine Sonderanfertigung, die das Mischwerkzeug einer Chargenmischanlage und somit die Mischkinematik unter Praxisbedingungen im Maßstab von 1:8 nachbildet. Alternative Laborverfahren zur Mischgutherstellung sind die Handmischung und die maschinelle Mischung mittels Schlag- und Rührmischer SRM (sog. REGO-Mischer) oder mittels Gegenlauf-Zwangsmischer GZM (sog. Freundl-Mischer), deren jeweilige Mischkinematik gerädetypisch ist. Die Gleichwertigkeit unterschiedlicher Mischverfahren bzw. -geräte wurde bisher nicht nachgewiesen.

Folgende Labormischverfahren bzw. -geräte werden in die Untersuchungen einbezogen:

- Zweiwellen-Zwangsmischer im Maßstab von 1:8,
- Schlag- und Rührmischer SRM (auch REGO-Mischer) und
- Gegenlauf-Zwangsmischer GZM (auch Freundl-Mischer).

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden zwei Asphalttragschicht-Varianten berücksichtigt, die sowohl im Labor als auch in der Asphaltmischanlage hergestellt und im Labor mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät verdichtet werden:

- Asphaltbeton der Sorte AC 32 T S mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen bei Warmzugabe (Referenz 50 M.-%) und
- Asphaltbeton der Sorte AC 32 T N mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen bei Kaltzugabe (Referenz 30 M.-%).

Zusätzlich werden die jeweils zum Einsatz kommenden Einzelkomponenten der jeweiligen Mischgutvariante – frische Gesteinskörnung inklusive Füller, Asphaltgranulat und Frischbindemittel – an der Asphalt-Mischanlage beschafft und im Labor unter Variation des Labormischverfahrens nachgemischt (unter Verwendung von Kontrollprüfungsergebnissen). Bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulats und bei Warmzugabe werden alle dargestellten Labormischverfahren genutzt, bei Simulation der Kaltzugabe kommt ausschließlich der Gegenlauf-Zwangsmischer zum Einsatz.

Vom in der Mischanlage hergestellten und in der Straße eingebauten Mischgut werden Bohrkerne entnommen und diese in die Laborprüfungen zur Charakterisierung der asphaltmechanischen Eigenschaften einbezogen.

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Herstellungsmodalitäten (Labor, Mischanlage, Baustelle) werden die hergestellten Asphalt-Probekörper umfangreichen Laborprüfungen unterzogen. Dabei werden die asphaltmechanischen Eigenschaften mittels gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfungen charakterisiert (Performance-Prüfungen zu Verformungs-, Kälte-, Ermüdungseigenschaften und Steifigkeit).

Die an den im Labor hergestellten Proben ermittelten Ergebnisse werden den Ergebnissen aus Proben gegenübergestellt, die einerseits im Labor aus in der Mischanlage hergestelltem Asphaltmischgut verdichtet wurden und andererseits aus der Straße in Form von Bohrkernproben entnommen wurden.

In der Folge werden folgende Abkürzungen zur Unterscheidung der MischgutVarianten verwendet:

- ZZM für im Labor mittels Zweiwellen-Zwangsmischer hergestellte Proben,
- GZM für im Labor mittels Schlag- und Rührmischer hergestellte Proben,
- SRM für im Labor mittels Gegenlauf-Zwangsmischer hergestellte Proben,
- MA für großtechnisch in der Asphaltmischanlage hergestellte Proben,
- „in situ“ für aus der Straße entnommene Bohrkernproben.

Schließlich wird jenes Labormischverfahren herausgearbeitet, das hinsichtlich der resultierenden Gebrauchseigenschaften den größtmöglichen Praxisbezug aufweist. Abbildung 3-1 gibt die Untersuchungsmethodik des Forschungsprojektes, untergliedert in 4 Arbeitspakete (AP), wieder.

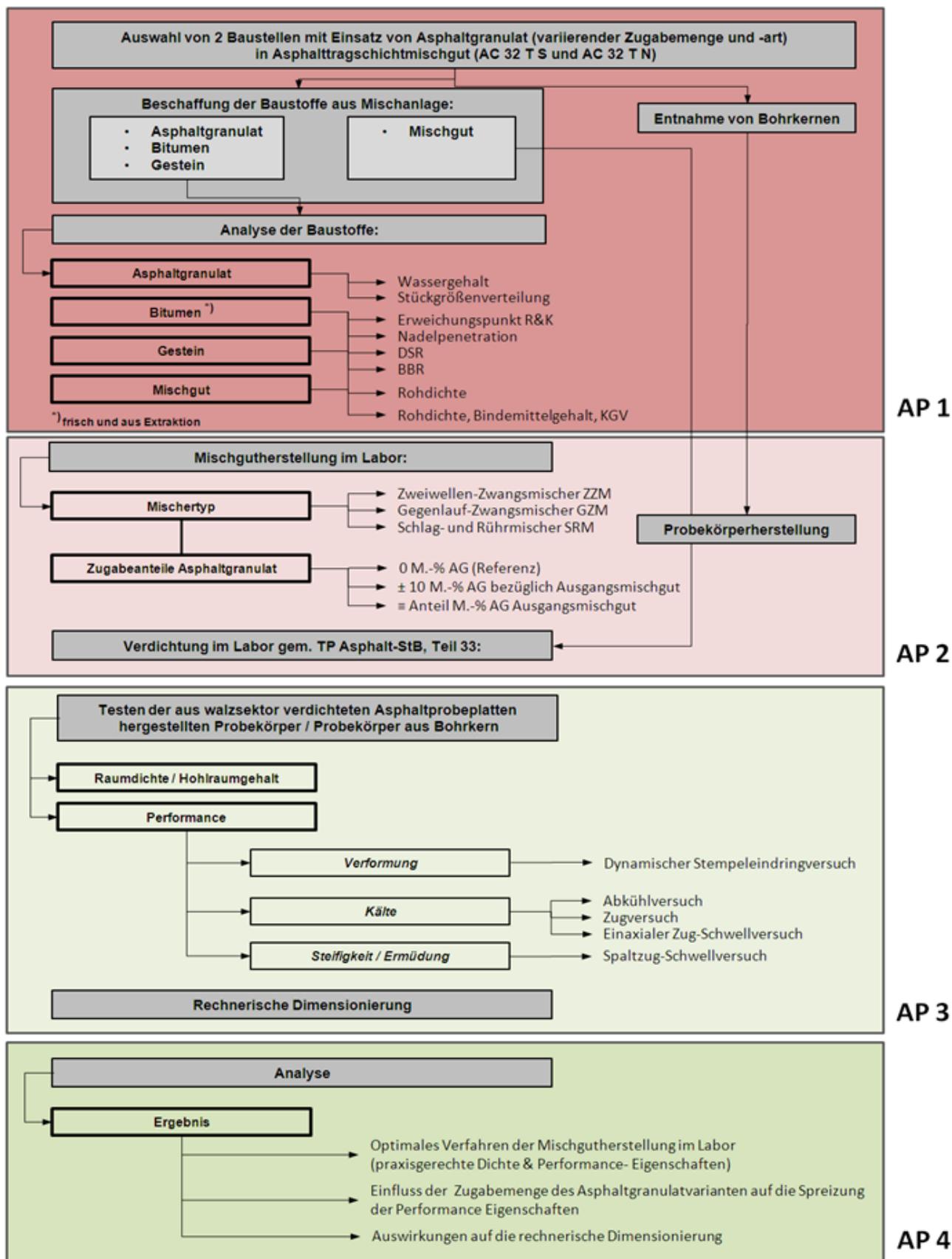


Abbildung 3-1. Untersuchungsmethodik und Arbeitspakete (AP).

## 3.2 Verwendete Baustoffe und Rezepturen

Die zur Herstellung im Labor benötigten Baustoffkomponenten für die herzustellenden Asphalttragschicht-Varianten setzen sich aus frischen (ungebrauchten) und bereits verwendeten Baustoffen zusammen. Die in der Kontrollprüfung ermittelte jeweilige Zusammensetzung der Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S und AC 32 T N wird durch die Dosierung der Mengenanteile in den entsprechenden Kornklassen und des Bindemittelgehalts realisiert.

### 3.2.1 Gestein

Zur Herstellung der Asphalttragschichtmischgut-Varianten (vgl. Abschnitt 3.3) kommen ein magmatisches (Diabas) und ein Sedimentgestein (Kalkstein) zur Anwendung.

Kalkstein ist ein biogenes Sedimentgestein, das hauptsächlich aus den beiden Mineralien Kalzit und Aragonit (beide  $\text{CaCO}_3$ ) und aus Dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) besteht. Das Gestein kann aus feinkristallinem Kalkschlamm oder aus zusammengeschwemmten Kalkschalen oder anderen karbonatischen Organismenresten entstanden sein. Seine mittlere Rohdichte beträgt  $2,717 \text{ g/cm}^3$ .

Diabas wird in der Gesteinskunde als ein basaltisches, mittelkörniges subvulkanisches Gestein genannt, das hauptsächlich aus Plagioklas und Augit besteht und ein rein körniges Gefüge besitzt. Seine mittlere Rohdichte beträgt  $2,910 \text{ g/cm}^3$ .

- Die im Labor zusammengesetzte Asphaltmischgut-Variante AC 32 T S wird aus Natursand für die Gesteinskörnung 0/2 und aus Kalkstein für die Gesteinskörnungsgemische 0/5, 5/22 und 22/32 hergestellt. Als Füller dient Kalksteinmehl.
- Die im Labor zusammengesetzte Asphaltmischgut-Variante AC 32 T N wird aus Natursand für die Gesteinskörnung 0/2 und aus Diabas für die Gesteinskörnungsgemische 8/32 und 22/32 hergestellt. Als Füller dient Kalksteinmehl.

Die Aufbereitung aller Gesteine – mit Ausnahme des Füllers – beinhaltet Nasssiebung, Waschen sowie anschließende Trockensiebung zur Auftrennung der entsprechenden Kornklassen.

### 3.2.2 Bitumen

Es kommen je 2 Bindemittel pro Mischgut-Variante zur Anwendung:

- Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S): Als frisches Bindemittel für alle Asphaltmischungen mit Asphaltgranulat wird Straßenbaubitumen 50/70 der Total Bitumen Deutschland GmbH eingesetzt. Als frisches Bindemittel für eine Referenzmischung ohne Asphaltgranulat wird Straßenbaubitumen 30/45 der Total Bitumen Deutschland GmbH eingesetzt, welches der geforderten Bindemittelart bzw. -sorte gem. Datenblatt zur Erstprüfung des AC 32 T S aus der Mischanlage entspricht.

- Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N): Als frisches Bindemittel für alle Asphaltmischungen mit Asphaltgranulat wird Straßenbaubitumen 70/100 der Total Bitumen Deutschland GmbH eingesetzt. Als frisches Bindemittel für eine Referenzmischung ohne Asphaltgranulat wird Straßenbaubitumen 50/70 der Total Bitumen Deutschland GmbH eingesetzt, welches der geforderten Bindemittelart bzw. -sorte gem. Datenblatt zur Erstprüfung des verwendeten AC 32 T N aus der Mischanlage entspricht.

### 3.2.3 Ausbauasphalt in Form von Asphaltgranulat

Grundsätzlich muss eine ausreichende Homogenität des Asphaltgranulats sichergestellt sein, um die definierten Sollvorgaben gemäß Erstprüfung des Asphaltmischgutes bezüglich der Sieblinien bei allen herzustellenden Einzelmischungen einhalten zu können. Deshalb wird für beide zu berücksichtigenden Asphaltgranulate eine Homogenisierung vorgenommen und diese gemäß den Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, TL AG-StB 09 (FGSV, 2009d) durch die Bestimmung der Stückgrößenverteilung und Asphaltgranulat-Zusammensetzung klassifiziert.

Die Asphaltgranulate werden in ausreichender Menge in der Halle des ISBS-Prüflabors bei Raumtemperatur trocken gelagert und durch mehrfaches Umsetzen homogenisiert. Die Entnahme von Proben erfolgt an verschiedenen Stellen der jeweiligen Halde.

Die Stückgrößenverteilungen der zu untersuchenden Asphaltgranulat-Varianten werden durch Siebung mit den nach TP Asphalt-StB, Teil 2 (FGSV, 2010a) vorgesehenen Analysesieben ermittelt. Es werden Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt und Rohdichte sowie am rückgewonnenen Bindemittel konventionelle und erweiterte Bindemittleigenschaften bestimmt.

Die Gleichmäßigkeit wird anhand der ermittelten Spannweiten und Mittelwerte der Merkmalsgrößen Bindemittelgehalt, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Füllergehalt, Sandgehalt und Kornanteil über 2 mm beurteilt und die Einzelwerte auf Normalverteilung beziehungsweise Homogenität überprüft.

Es werden die in Tabelle 3-1 spezifizierten Asphaltgranulat-Varianten 1 & 2 für die Herstellung der Asphaltmischgut-Varianten AC 32 T S und AC 32 T N (vgl. Tabelle 3-2) berücksichtigt.

### 3.2.4 Asphaltmischgut

Folgende Asphaltbetone für Asphalttragschichten der nachfolgenden Sorten kommen zum Einsatz:

- AC 32 T S (Mischgut-Variante 1), hohe Verkehrsbeanspruchung) und
- AC 32 T N (Mischgut-Variante 2), normale Verkehrsbeanspruchung).

Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) wird unter Verwendung einer Paralleltrommel ein Anteil an Asphaltgranulat in Höhe von 50 M.-% zugegeben. Die Herstellung des As-

phaltragschichtmischguts stammt vom 12.07.2012 durch die Hermann Wegener GmbH & Co. KG, Standort Braunschweig.

Bei Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) wird im Kaltzugabeverfahren ein Anteil an Asphaltgranulat in Höhe von 30 M.-% zugegeben. Die Herstellung des Asphalttragschichtmischguts stammt vom 9.11.2012 durch die KEMNA BAU Andreae GmbH & Co. KG im Asphaltspitt-Werk Braunschweig.

Tabelle 3-2 gibt die Zusammensetzung und Eigenschaften der berücksichtigten Asphalttragschicht-Varianten wieder.

### **3.3 Laborverfahren zur Herstellung von Asphaltmischgut**

Die Asphaltmischgutherstellung im Labor umfasst das Bereitstellen und Einwiegen der Gesteinskörnungen und des Bitumens, sowie das Mischen der Baustoffkomponenten.

Die jeweilige Korngrößenverteilung der im Labor hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten entspricht den Kenndaten aus Tabelle 3-2.

Die Mischgutkomponenten werden mit folgenden Labor-Mischern zu Asphalttragschichtmischgut vermengt:

- Zweiwellen-Zwangsmischer ZZM im Maßstab 1:8 (ISBS Sonderanfertigung),
- Gegenlauf-Zwangsmischer GZM (Freundl-Mischer),
- Schlag- und Rührmischer SRM (REGO-Mischer).

**Tabelle 3-1: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltgranulat-Varianten**

Merkmal		Einheit	Asphaltgranulat-Variante 1	Asphaltgranulat-Variante 2	
Korngrößenverteilung	Natursand	≤ 0,063 mm	M.-%	5,5	6,2
		0,063 / 0,25 mm	M.-%	9,3	9,0
		0,25 / 1 mm	M.-%	19,9	19,7
		1 / 2 mm	M.-%	10,9	8,9
		2 / 5,6 mm	M.-%	17,9	17,0
		5,6 / 8 mm	M.-%	12,4	12,3
		8 / 11,2 mm	M.-%	10,9	16,0
		11,2 / 16 mm	M.-%	8,0	7,5
		16 / 22,4 mm	M.-%	5,0	3,4
		22,4 / 31,5 mm	M.-%	0,2	-
		31,5 / 42,5 mm	M.-%	-	-
<b>Bindemittelgehalt</b>		M.-%	3,4	4,7	
<b>Rohdichte</b>		g/cm <sup>3</sup>	2,623	2,594	
<b>Erweichungspunkt Ring &amp; Kugel</b>		° C	67,0	68,6	
<b>Nadelpenetration</b>		[0,1 mm]	17,7	17,1	

**Tabelle 3-2: Zusammensetzung und Eigenschaften der berücksichtigten Asphaltmischgut-Varianten 1 und 2.**

Merkmal		Einheit	AC 32 T S	AC 32 T N	
Korngrößenverteilung	Natur-sand	≤ 0,063 mm	M.-%	7,8	5,5
		0,063 / 0,25 mm	M.-%	5,8	6,1
		0,25 / 1 mm	M.-%	14,0	18,5
		1 / 2 mm	M.-%	7,9	8,6
		2 / 5,6 mm	M.-%	12,7	10,3
		5,6 / 8 mm	M.-%	10,5	7,0
		8 / 11,2 mm	M.-%	8,9	8,0
		11,2 / 16 mm	M.-%	9,8	6,4
		16 / 22,4 mm	M.-%	8,7	9,5
		22,4 / 31,5 mm	M.-%	12,9	20,1
		31,5 / 42,5 mm	M.-%	0,9	-
Summe			100	100	
<b>Asphaltgranulat</b>		M.-%	50	30	
<b>Zielbindemittelsorte Asphalt <sup>*)</sup></b>		-	30/45	50/70	
<b>Gesteinsart</b>		-	Kalkstein	Diabas	
<b>Frischbindemittelsorte</b>		-	50/70	70/100	
<b>Bindemittelgehalt</b>		M.-%	4,3	4,0	
<b>Rohdichte</b>		g/cm <sup>3</sup>	2,565	2,655	
<b>Raumdichte</b>		g/cm <sup>3</sup>	2,407	2,503	
<b>Hohlraumgehalt</b>		V.-%	6,2	5,7	
<b>Erweichungspunkt Ring &amp; Kugel</b>		° C	61,6	55,6	

<sup>\*)</sup> Bindemittel resultierend aus den Ergebnissen Erweichungspunkt Ring und Kugel EP<sub>RuK</sub>

Zunächst werden die Gesteinskörnungen, mit der größten Kornklasse beginnend, in folgender Reihenfolge eingewogen und erwärmt:

- Körnung 22/32,
- Körnung 11/22,
- Körnung 8/11,
- Körnung 5/8,
- Natursand,
- Gesteine der Körnung 2/5 und
- Füller.

Anschließend wird das temperierte Bitumen bereitgestellt.

Um die Erwärmung von Asphaltgranulat in der Paralleltrommel der Asphaltmischanlage zu simulieren, wird im Labor bei Warmzugabe das Asphaltgranulat über eine Zeitdauer von vier Stunden auf eine Temperatur von  $T = 130\text{ °C}$  erwärmt. Dies geschieht in Anlehnung an das Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA) (FGSV, 2009b), in dem im Abschnitt „Erwärmung von Asphaltgranulat in besonderer Vorrichtung“ die Temperatur des Asphaltgranulats in der Mischanlage von  $130\text{ °C}$  definiert ist. Die Zeitdauer von 4 Stunden ist in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 35 gewählt.

Das Asphaltgranulat für die Kaltzugabe wird bei Raumtemperatur in verschlossenen Bleheimern gelagert, um einen eingestellten Wassergehalt von 3 M.-% zu halten. Ein Wassergehalt von 3 M.-% entspricht erfahrungsgemäß dem mittleren Wassergehalt in Asphaltgranulat-Halden (ohne Überdachung).

Die Temperatur der frischen Gesteinskörnungen wird bei der Kaltzugabe in Abhängigkeit des Zugabeanteils des Asphaltgranulats, entsprechend den Vorgaben des Merkblattes für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA), festgelegt.

Es ergeben sich somit für die frischen Gesteinskörnungen in Abhängigkeit vom Zugabeanteil und der Zugabeart des Asphaltgranulats Temperaturen gemäß Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4.

**Tabelle 3-3: Temperaturen der frischen Gesteinskörnungen beim Mischprozess in Abhängigkeit von Zugabeanteil und Zugabeart von Asphaltgranulat (AG) für Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)**

Anteil AG	$T_{\text{Gestein}} [\text{°C}]$	
	Kaltzugabe AG 3 M.-% $\text{H}_2\text{O}$ @ $20\text{ °C}$	Warmzugabe AG, 1 M.-% $\text{H}_2\text{O}$ @ $130\text{ °C}$
40 M.-%	317 (287+30)	205
50 M.-%	335 (305+30)	220
60 M.-%	-	245

**Tabelle 3-4: Temperaturen für die frischen Gesteinskörnungen beim Mischprozess in Abhängigkeit von Zugabeanteil und Zugabeart von Asphaltgranulat (AG) für Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)**

Anteil AG	T <sub>Gestein</sub> [°C]	
	Kaltzugabe AG 3 M.-% H <sub>2</sub> O @ 20 °C	Warmzugabe AG 1 M.-% H <sub>2</sub> O @ 130 °C
20 M.-%	224 (200+24)	170
30 M.-%	260 (230+30)	175
40 M.-%	295 (265+30)	180

Die Mischtemperatur des Asphaltmischgutes wird in Abhängigkeit der Viskosität des eingesetzten Bitumen gemäß TP Asphalt-StB, Teil 35 „Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium“ (FGSV, 2007b) gewählt. Für Straßenbaubitumen 30/45 soll die Mischtemperatur mindestens 175 °C betragen, welche hier für die Asphalttragschichtmischgut-Variante 1 (AC 32 T S) zur Anwendung kommt. Das Bindemittel der Asphalttragschichtmischgut-Variante 2 (AC 32 T N) ist Straßenbaubitumen 50/70, für welche die Mischtemperatur mindestens 150 °C betragen soll; gewählt wird hier eine Mischtemperatur von 160 °C.

Der Ablauf der Mischgutherstellung ist wie folgt:

- Einfüllen der heißen Gesteinskörnungen in den Labormischer,
- Zugabe des Füllers,
- Mischen für eine Dauer von 20 s,
- Einfüllen des Asphaltgranulates und Mischen bei Simulation der Kaltzugabe für eine Dauer von 30 s und bei Simulation der Warmzugabe für die Dauer von 15 s,
- Zugabe des heißen, frischen Bitumens bzw. Bindemittels und Starten der Nachmischzeit von 180 s.

Beide Asphalttragschicht-Varianten werden unter Variation des Mischertyps, des Zugabeanteils des Asphaltgranulats und des Zugabeverfahrens (Kalt- bzw. Warmzugabe) des Asphaltgranulats hergestellt.

### 3.3.1 Zweiwellen-Zwangsmischer (ZZM)

Beim Zweiwellen-Zwangsmischer sind Mischtrog und Mischwerkzeug jenen eines Asphaltmischwerkes im Maßstab 1:8 nachgebildet. Die Mischkinematik entspricht in etwa der einer konventionellen Mischanlage und liefert so eine praxisadäquate Vermischung der Ausgangskomponenten (sh. Renken und Lobach, 2006). Dieser Labormischer erzeugt Asphaltmischgut, welches dem Asphaltmischgut hinsichtlich Aufschluss der Asphaltgranulatstücke jenen eines werksgemischten Asphalttes weitgehend entspricht.



**Abbildung 3-2. Zweiwellen-Zwangsmischer und Mischtrog.**

Abbildung 3-2 zeigt den ZZM-Labormischer sowie den Mischtrog mit Mischwerkzeug. Die beiden Wellen (Abbildung 3-2, rechts) rotieren gegenläufig im Mischtrog und lassen so eine „Asphaltwolke“ über sich entstehen. Durch die horizontal liegenden gegenläufig rotierenden Wellen mit ihren senkrecht stehenden Schaufeln ist bei diesem Mischer-Typ eine Zwangsvermischung gegeben. Die im Vergleich zu den anderen verwendeten Mixern um 90° gedrehte Anordnung der Mischwerkzeuge stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar. Auch die Rotationsgeschwindigkeit ist deutlich höher als bei den anderen eingesetzten Geräten. Im Zwei-Wellen-Zwangsmischer können Mengen von 16 kg bis maximal 40 kg in einer Charge gemischt werden.

### 3.3.2 Gegenlauf-Zwangsmischer (GZM)

Beim Gegenlauf-Zwangsmischer (Abbildung 3-3) handelt es sich um einen Zwangsvermischer. Der etwa 75 dm<sup>3</sup> große Kessel rotiert gegenläufig zu der zentrisch angeordneten Welle, an der das Mischwerkzeug befestigt ist. Dadurch bewegt sich das Mischgut „zwangsweise“ zwischen den sich drehenden Mischschaufeln, womit eine gleichmäßige Vermischung der Materialien sichergestellt ist. Allerdings wird das Asphaltmischgut im Vergleich zu großtechnischen Mischanlagen verhältnismäßig langsam umgewälzt.

Es können Mischgutmengen in einer Spanne von 6 bis 50 kg in einer Charge hergestellt werden. Im Betriebszustand bei geschlossenem Deckel sind der Mischkessel und das Mischwerkzeug um ca. 30° geneigt, was durch den sich drehenden Kessel eine zusätzliche Vermischung begünstigt. Neben der Drehzahlregelung lässt sich auch dieser Mischer stufenlos beheizen, so dass bei definierter Temperatur gemischt werden kann.



**Abbildung 3-3. Gegenlauf-Zwangsmischer.**

### 3.3.3 Schlag- und Rührmischer (SRM)

Der Schlag- und Rührmischer (SRM) gehört zum Standard-Inventar vieler Asphaltlabore, wenngleich er ursprünglich als Mischgerät in der Lebensmittelbranche konzipiert wurde. Der SRM ist in Abbildung 3-4 dargestellt. In einem 20 dm<sup>3</sup> großen Edelstahlkessel werden durch das Rührwerkzeug die einzelnen Baustoffkomponenten miteinander vermischt. In einer Charge können 5 bis 16 kg Mischgut hergestellt werden.

Der als Rührwerkzeug gewählte Rührbesen ist zur optimalen Durchmischung engmaschig, aber grob genug, dass erfahrungsgemäß auch das Größtkorn eines Asphaltmischguts für Asphalttragschichten (z. B. AC 32 T S) gleichmäßig untergemischt werden kann. Das Rührwerkzeug befindet sich auf einer stehenden Welle, welche durch eine stufenlose elektronische Drehzahlregelung gesteuert werden kann. Im Vergleich zu industriellen Mischanlagen können nur geringe Drehzahlen erzielt werden.

Neben der reinen Rotation kann über eine mechanische Regelung auf zusätzliches Schlagen umgestellt werden, was durch ein Kardangelen in der stehenden Welle realisiert wird. Erfahrungsgemäß ist zur Mischung von Asphaltmischgut für Asphalttragschichten sowohl die Drehzahlregelung als auch die Schlagauslenkung in Maximalstellung zu wählen.

Der SRM verfügt über eine nicht regelbare Heizeinheit bestehend aus einer Glühspirale, welche sich unterhalb des Kessels befindet. So kann einer schnellen Abkühlung des Asphaltmischgutes beim Mischen vorgebeugt und dieses auf der erforderlichen Mischtemperatur gehalten werden.



**Abbildung 3-4. Schlag- und Rührmischer.**

### 3.3.4 Walzsektor-Verdichtung zur Herstellung von Asphalt-Probepplatten

Für die Prüfung der Asphalttragschicht-Varianten der Sorten AC 32 T S und AC 32 T N werden nach dem Herstellen der Asphaltgemische Asphalt-Probepplatten hergestellt.

Die Herstellung der  $320 \times 200 \times 90 \text{ mm}^3$  großen Asphalt-Probepplatten erfolgt in Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP Asphalt-StB, Teil 33: „Verfahren zur Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium“ (FGSV, 2007a).

Die Dicke der Asphalt-Probepplatten richtet sich nach dem Größtkorn des herzustellenden Mischgutes sowie nach den Mindestanforderungen der Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt, Teil 25 A 2, der DIN EN 12697-46 und der AL Sp-Asphalt 09. Gewählt werden Asphalt-Probepplatten mit einer Höhe von 80 und 90 mm.

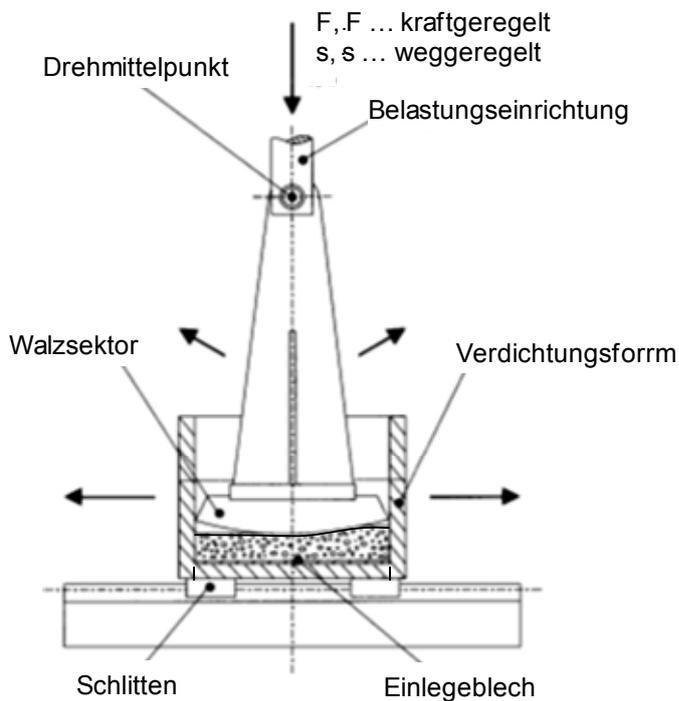
Das Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht aus einer Verdichtungsform mit Einfüllaufsatz und einem sektorförmigen Verdichtungskörper (in der Folge als Walzsektor bezeichnet). Die Verdichtung erfolgt durch eine wiegeartige Bewegung des auf den Kreismittelpunkt fixierten Walzsektors auf der Probenplattenoberfläche, verursacht durch eine translatorische Bewegung der Verdichtungsform. Das Funktionsprinzip des Walzsektor-Verdichtungsgerätes kann Abbildung 3-5 entnommen werden.

Die für die Herstellung der Asphalt-Probepplatten erforderliche Mischgutmenge berechnet sich aus der angestrebten Dicke der Asphalt-Probepplatten, der Grundfläche der Verdichtungsform und der angestrebten Raumdichte des verdichteten Asphaltes.

Durch die herstellungsbedingten Unterschiede der Asphaltmischgutvarianten - Verwendung variierender Zugabeanteile des Asphaltgranulats - können sich Ungleichheiten bezüglich des Dichteniveaus und der mechanischen Eigenschaften der aus dem Mischgut hergestellten Asphalt-Probepplatten ergeben.

Um eine Vergleichbarkeit der Asphalt-Probepplatten hinsichtlich dieser Merkmalsgrößen zu gewährleisten, werden die Hohlraumgehalte der Asphalt-Probepplatten vor deren weiterer Verwendung bestimmt. Ergeben sich Standardabweichungen von  $\sigma < 0,4 \text{ Vol.-%}$ , so ist gemäß TP Asphalt-StB, Teil 8 (FGSV, 2007c) die Wiederhol-

präzision gegeben, im Falle von maximalen Abweichungen von  $\sigma < 1,1$  Vol.-% ist die Vergleichspräzision eingehalten.

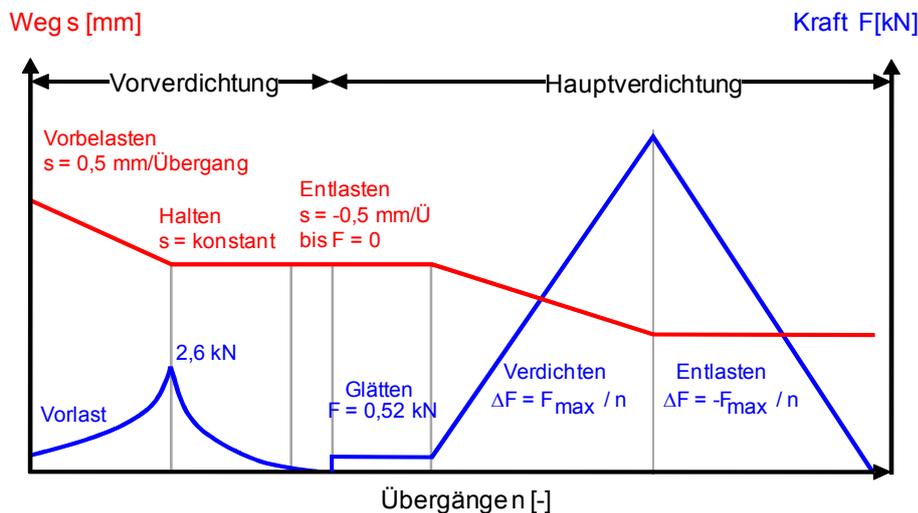


**Abbildung 3-5. Walzsektor-Verdichtungsgerät (FGSV, 2007a).**

Zunächst wird das zu verdichtende Asphaltmischgut auf die Verdichtungstemperatur (bei Straßenbaubitumen: 135 °C) temperiert und anschließend gleichmäßig auf das Einlegeblech in die auf 80 °C vorgeheizte, rechteckige Verdichtungsform gelegt. Die Verdichtungsform befindet sich auf einem spurgeführten, horizontal beweglichen Schlitten. Anschließend wird der ebenfalls beheizte Walzsektor abgesenkt. Daraus resultiert eine Druckspannung zwischen dem Sektor und dem zu verdichtenden Mischgut. Zeitgleich wird die Verdichtungsform horizontal hin und her bewegt. Der dabei mitgeführte Walzsektor wird während des Vorgangs um seinen Drehmittelpunkt ausgelenkt und erzeugt eine Walzbewegung auf der Oberseite der Mischgutprobe.

Für die Herstellung von Asphalt-Probepplatten mit praxisadäquaten Eigenschaften ist ein Verdichtungsregime definiert, das die Verdichtungsabläufe in situ möglichst praxisnah simuliert. Der Verdichtungsprozess gliedert sich in zwei Verdichtungsdurchgänge. Während der *Vorverdichtung* wird die Verdichtungsarbeit der schwimmenden (Hochverdichtungs-) Einbaubohle des Straßenfertigers nachgestellt. Dazu wird der Walzsektor mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm / Übergang weggeregelt abgesenkt, bis auf der Asphalt-Probepplatte eine Last von 2,6 kN erreicht wird. Die dabei erreichte Plattenhöhe wird für weitere fünf Übergänge konstant gehalten. Danach wird der Walzsektor hochgefahren (0,5 mm / Übergang), bis die Platte vollständig entlastet ist. Mittels der *Hauptverdichtung* wird der Verdichtungsprozess der in situ eingesetzten Glattmantelwalzen simuliert. Zunächst werden zur Glättung der Ober-

fläche 15 Übergänge bei konstanter Last von 0,52 kN aufgebracht. Danach wird die Linienlast kraftgeregelt in 15 Stufen bis zu Erreichen einer Maximalkraft von 19,5 kN gesteigert. Die Entlastung erfolgt in weiteren 15 gleichen Laststufen. In Abbildung 3-6 sind der Verlauf der zur Verdichtung aufgebracht Kraft sowie die dabei erreichte Plattenhöhe während dieser Verdichtungsschritte schematisch dargestellt.



**Abbildung 3-6. Plattenhöhe und aufgebracht Kraft je cm Plattenbreite während der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerätes: weggeregelte Vorverdichtung, kraftgeregelt Hauptverdichtung (Ringleb, 2012).**

Erfahrungsgemäß werden Verdichtungsgrade zwischen 99 % und 101 % – bezogen auf die Dichte des Marshall-Probekörpers – erreicht. Mit der kraftgeregelt Hauptverdichtung werden übermäßige Beanspruchungen der Korn-zu-Korn-Kontaktflächen und so unzulässige Kornzertrümmerungen vermieden.

### 3.4 Performance-Prüfungen zur Ansprache der Asphalteeigenschaften

Für die Beurteilung der Einflüsse der Zugabe (-Menge und -Art) von Asphaltgranulat sowie der Herstellungsmodalitäten auf die Gebrauchseigenschaften werden die Verformungs-, Kälte- und Ermüdungseigenschaften im Labor prüftechnisch angesprochen. Die eingesetzten Prüfverfahren sind nachfolgend beschrieben.

#### 3.4.1 Verformungsverhalten

Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens der Asphalttragschicht-Varianten wird der dynamische Stempel Eindringversuch eingesetzt. Für den dynamischen Stempel Eindringversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 (FGSV, 2010b) werden aus den hergestellten Asphalt-Probeplatten (Höhe 80 mm) Bohrkern mit einem Durchmesser von 200 mm entnommen, die Raumdichte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 6 (FGSV, 2010c) bestimmt und anschließend bei Raumtemperatur bis zur Massenkonstanz gelagert.

Beim Stempeleindringversuch wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper (Durchmesser  $\varnothing = 197 \pm 5$  mm) mit einem Druckstempel zyklisch belastet, dessen Außendurchmesser ( $\varnothing = 80$  mm) so klein ist, dass der Asphaltprüfkörper nur in einem eingeschränkten mittleren Bereich einer Druckbeanspruchung ausgesetzt ist. Damit werden rund um den beanspruchten Bereich wirkende Einspannungseffekte simuliert, wie sie auch in der Straße aufgrund der Schichtausdehnung vorhanden sein müssen. Der Lastimpuls wird sinusförmig mit Lastpausen gewählt (Abbildung 3-7). Ein Belastungszyklus besteht somit aus Lastimpuls und Lastpause.

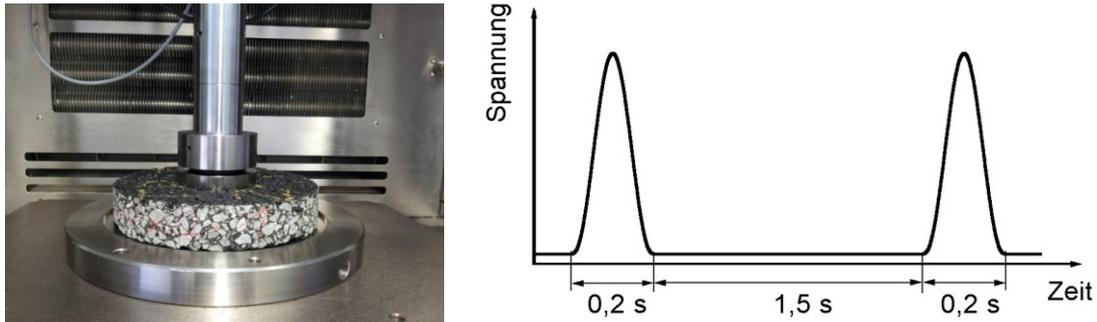


Abbildung 3-7. Stempeleindringversuch: Prüfvorrichtung (links) und Lastimpuls (rechts).

Während der Prüfung akkumulieren sich bleibende Verformungen (Abbildung 3-8), wodurch es zu einer Verringerung der Probekörperhöhe kommt.

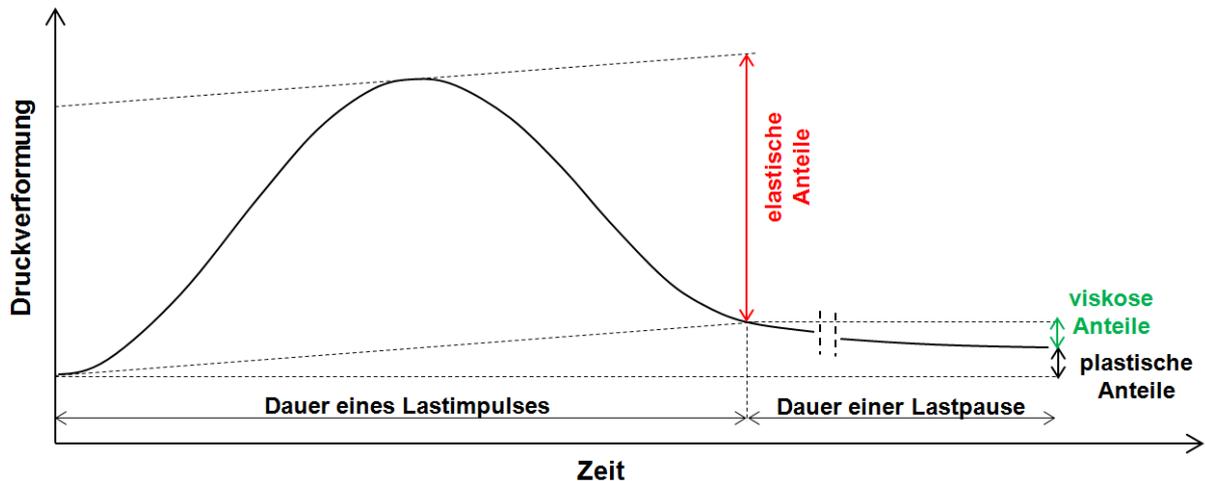


Abbildung 3-8. Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Stempeleindringversuch, schematisch (Wistuba und Isailovic, 2014).

Für jeden Lastzyklus kann die plastische Druckdehnung nach folgender Gleichung berechnet werden.

$$\epsilon_{pd,i} = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 1000 \quad [\text{‰}] \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

$\epsilon_{pd,i}$  plastische Druckdehnung nach dem i-ten Belastungszyklus [%],  
 $h_0$  Höhe des Probekörpers am Anfang der Prüfung [mm],  
 $h_i$  Höhe des Probekörpers nach i Belastungszyklen [mm].

Die akkumulierten axialen plastischen Dehnungen als Funktion der Anzahl an Belastungszyklen bilden die Kriechkurve. Die Kriechkurve wird mittels Methode der kleinsten Quadrate durch folgende Funktion beschrieben:

$$\epsilon_{pd,n} = b \cdot n^a \quad [\%] \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

$\epsilon_{pd,n}$  plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [%],  
a, b Regressionsparameter [-],  
n Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Der Anstieg der Kriechkurve (erste Ableitung) ergibt die Dehnungsrate (Kriechrate). Dieser Wert wird zusammen mit der zugehörigen plastischen Druckdehnung und der Anzahl der Belastungszyklen an einem bestimmten Punkt als ein Maß für die Berücksichtigung der Beständigkeit des Mischgutes gegen bleibende Verformung verwendet:

$$\epsilon_{pd,n} = a + b \cdot n^k + c \cdot (e^{dn} - 1) \quad [\%] \quad \text{Gleichung 3-3}$$

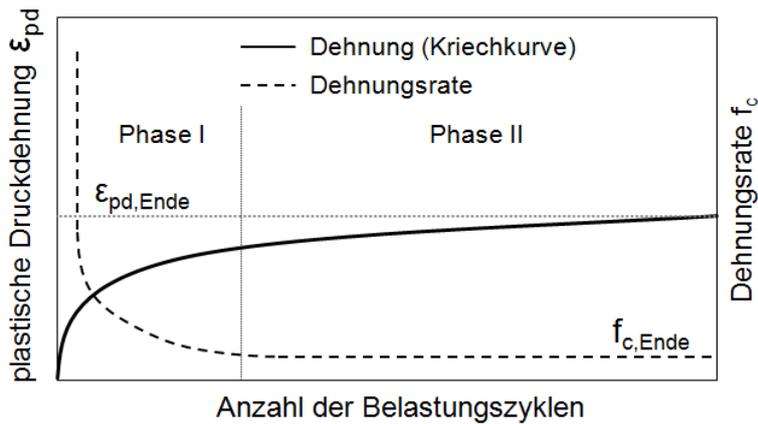
mit:

$\epsilon_{pd,n}$  plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [%],  
a,b,c,d,k Regressionsparameter [-],  
n Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Typische Kriechkurven für Walzasphalte zeigen Abbildung 3-9 (ohne Wendepunkt) und Abbildung 3-10 (mit Wendepunkt). Jede Kriechkurve weist zumindest 2 Phasen auf. In Phase I nimmt die Krümmung der Kriechkurve stark ab, Phase II zeigt einen quasilinearen Kurvenverlauf. Für den Fall, dass es zu keiner Stabilisierung der plastischen Druckverformung kommt, ändert die Krümmung der Kriechkurve im Wendepunkt ihr Vorzeichen und es bildet sich eine Phase III mit einem progressiven Anstieg der plastischen Verformungen. Der Wendepunkt ist definiert als jener Punkt der Kriechkurve, in dem die Dehnungsrate den niedrigsten Wert aufweist.

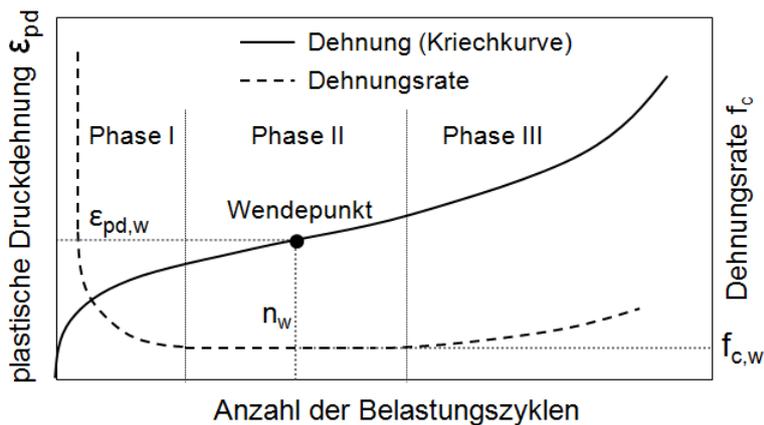
Üblicherweise kann bei Asphalten mit ausreichend hohem Verformungswiderstand keine Phase III beobachtet werden. Daher wird in der Prüfvorschrift gemäß Regelwerk (TP Asphalt-StB) kein Wendepunkt in der Kriechkurve berücksichtigt.

Im Fall A (kein Wendepunkt; vgl. Abbildung 3-9) wird der Anstieg der Kriechkurve im quasilinearen Bereich zum Versuchsende als Dehnungsrate  $f_{c,Ende}$  angegeben. Die zugehörige plastische Druckdehnung am Ende der Prüfung wird als charakteristischer Wert  $\epsilon_{Ende}$  angegeben.



**Abbildung 3-9. Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate bei einem Stempelversuch ohne Wendepunkt (Fall A).**

Im Fall B (Wendepunkt) werden die plastische Druckdehnung  $\epsilon_{pd,w}$  im Wendepunkt angegeben, die Anzahl der erfolgten Belastungszyklen  $n_w$  bis zum Wendepunkt und die Dehnungsrate  $f_{c,w}$  im Wendepunkt.



**Abbildung 3-10. Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate bei einem Stempelversuch mit Wendepunkt (Fall B).**

Prüfergebnis des Stempelversuchs ist die bleibende axiale Druckdehnung zusammen mit der Dehnungsrate jeweils am Versuchsende (spätestens nach 10.000 Lastwechseln) bzw. im Wendepunkt der Kriechkurve.

Der dynamische Stempelversuch wird in diesem Projekt unter nachfolgenden Randbedingungen durchgeführt:

**Tabelle 3-5: Versuchsbedingungen gem. TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2**

<b>Prüfgröße</b>		<b>Prüfbedingung</b>
Temperatur	T	50 °C
Probekörperdurchmesser und -höhe	Ø, h	200 mm / 80 mm
Zyklusdauer	t	1,7 s
Dauer der Oberlast	t <sub>B</sub>	0,2 s
Lastpause	t <sub>E</sub>	1,5 s
Oberspannung	σ <sub>o</sub>	0,8 MPa
Unterspannung	σ <sub>u</sub>	0,02 MPa

### 3.4.2 Kälteverhalten

Zur Ansprache der Asphalteeigenschaften bei tiefen Temperaturen (Rissresistenz) werden der Einaxiale Zugversuch und der Abkühlversuch nach der Technischen Prüfvorschrift „Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen“ (FGSV, 1994) durchgeführt.

Dazu werden prismatische Probekörper der Abmessungen 55 x 55 x 160 mm<sup>3</sup> aus den Asphalt-Probepplatten (siehe Kapitel 3.3.4) gesägt.

#### 3.4.2.1 Abkühlversuch

Zur Ermittlung der bei tiefen Temperaturen durch behinderte thermische Dehnung auftretenden kryogenen Zugspannungen werden Abkühlversuche gemäß Prüfnorm DIN EN 12697-46 durchgeführt.

Dabei wird ein (an Adapter geklebter) prismatischer Probekörper der Länge nach in die Prüfeinrichtung eingespannt und einer vorgegebenen Abkühlrate von  $\dot{\Delta} = 10 \text{ K/h}$  ausgesetzt. Während des Abkühlvorgangs wird die Probekörperlänge konstant gehalten. Durch die Messung der Probekörperlänge über induktive Wegaufnehmer, die sich außerhalb der Prüfzelle befinden, kann die unvermeidliche Temperaturdehnung des Prüfrahmens vom Schrittmotor ausgeglichen werden.

Durch den behinderten thermischen Schrumpf werden im Probekörper kryogene Zugspannungen hervorgerufen. Erreichen die kryogenen Spannungen die Zugfestigkeit des Probekörpers, kommt es zum Bruch. Als Ergebnis der Prüfung werden die kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur  $\sigma_{\text{cry}}(T)$  sowie die erreichte Bruchtemperatur  $T_{\text{Br}}$  und die Bruchspannung  $\sigma_{\text{Br}}$  ausgegeben.

#### 3.4.2.2 Kältezugsversuch

Zur Ermittlung der Einaxialen Zugfestigkeit von Asphalt werden weggeregelte Zugversuche gemäß Prüfnorm DIN EN 12697-46 bei vier verschiedenen Temperaturen ( $T = -25^\circ\text{C}, -10^\circ\text{C}, +5^\circ\text{C}, +20^\circ\text{C}$ ) bei einer 3-fachen Versuchsbelegung durchgeführt. Der in die Prüfeinrichtung eingespannte Probekörper wird während der Temperier-

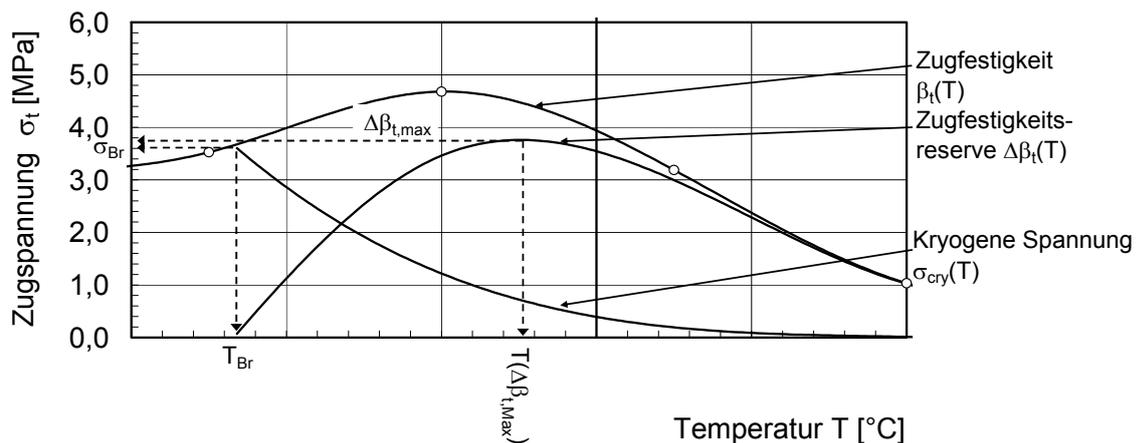
phase spannungsfrei auf Prüftemperatur gebracht. Nach der Temperierphase wird er mit einer Verformungsgeschwindigkeit von  $\dot{s} = 1 \text{ mm/min}$  bis zum Erreichen der Zugfestigkeit auseinander gezogen. Die Zugfestigkeit ist die bei Eintritt des Bruches erreichte Spannung oder – wenn bei hohen Prüftemperaturen kein Bruch auftritt – die maximal erreichte Zugspannung. Als Versuchsergebnisse wird die bei der Prüftemperatur erreichte Zugfestigkeit  $\beta_z(T)$  angegeben.

### 3.4.2.3 Zugfestigkeitsreserve

Die Zugfestigkeiten werden über die jeweilige Prüftemperatur aufgetragen. Zur Abschätzung der Zugfestigkeit bei nicht geprüften Temperaturen werden die Messpunkte mit einem kubischen Spline verbunden. Die Differenz der Zugfestigkeit und der in den Abkühlversuchen ermittelten kryogenen Spannung ergibt zu jeder Temperatur die Zugfestigkeitsreserve  $\Delta\beta_z(T)$  (vgl. Gleichung 3-4). Sie ist ein theoretisches Maß für die mechanogene Spannung, die der Probekörper zusätzlich zu der kryogenen Spannung schadlos ertragen kann (Arand et al., 1983). Die Temperatur  $T(\Delta\beta_{z,t,max})$ , bei der die Zugfestigkeitsreserve ihr Maximum aufweist, ist eine Kenngröße, die zur Einschätzung und zum Vergleich der Kälteempfindlichkeit des Asphalttes herangezogen wird.

$$\Delta\beta_z(T) = \beta_z(T) - \sigma_{cry}(T) \quad \text{Gleichung 3-4}$$

Abbildung 3-11 gibt das Prinzip zur Ermittlung der Zugfestigkeitsreserve aus den Versuchskurven des Zugversuchs und des Abkühlversuchs in einem Temperatur-Spannungs-Diagramm wieder.



**Abbildung 3-11. Prinzip zur Bewertung der Zugfestigkeitsreserve aus den Versuchskurven des Zugversuchs und des Abkühlversuchs in einem Temperatur-Spannungs-Diagramm (Arand et al., 1983).**

### 3.4.3 Ermüdungsverhalten

Zur Ansprache des Ermüdungsverhaltens von Asphalt werden Einaxiale Zug-Schwellversuche sowie Spaltzug-Schwellversuche durchgeführt.

#### 3.4.3.1 Einaxialer Zug-Schwellversuch

Beim Einaxialen Zug-Schwellversuch gem. EN 12697-46 (2011) wird ein prismatischer Probekörper in Längsrichtung mit einer sinusförmigen Zugspannung kraftgeregelt belastet. Dabei werden die Prüftemperatur und die Spannung variiert. Als Unterspannung wird die im Abkühlversuch bei der Prüftemperatur des Zug-Schwellversuchs gemessene kryogene Spannung angesetzt. Die für alle Zug-Schwellversuche eines Asphaltes und einer Temperatur konstante Unterspannung wird mit einer sinusförmig schwellenden, mechanogenen Spannung überlagert, deren Betrag je nach Anforderung variiert wird.

Die Probekörperabmessungen entsprechen den in Abschnitt 3.4.2.1 aufgeführten Werten. In einer Klebebank wird der Probekörper an Adapter geklebt. Nach Aushärtung des Klebers werden die Probekörper ausgemessen und die Probekörper in die Prüfmaschine eingebaut. Der untere Adapter wird mit der Grundplatte, der obere mit dem Prüfstempel verschraubt.

Vor Versuchsbeginn wird der Probekörper spannungsfrei auf die Prüftemperatur  $T$  abgekühlt. Danach wird die Zugkraft linear bis zum Erreichen der Unterspannung gesteigert und die durch Prüffrequenz  $f$ , Unterspannung  $\sigma_u$  und Oberspannung  $\sigma_o$  definierte Schwellbelastung setzt ein. In Abbildung 3-12 sind die Kenngrößen zusammengestellt, welche die sinusförmige Zug-Schwellspannung definieren.

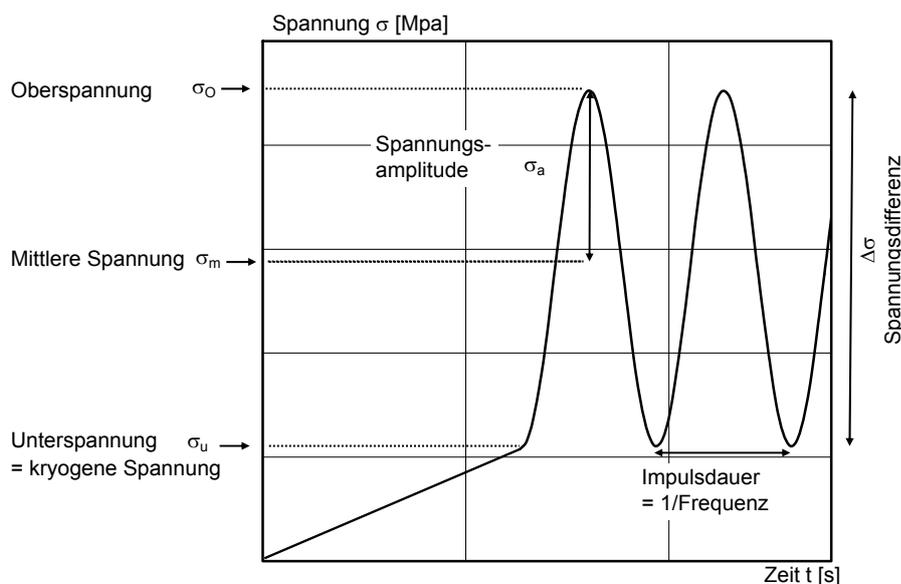


Abbildung 3-12. Kenngrößen der sinusförmigen Zug-Schwellbeanspruchung.

Der Probekörper wird so lange belastet, bis er reißt. Während der gesamten Versuchsdauer werden die Signale der Kraft- und Wegmesseinrichtungen kontinuierlich erfasst. Zur Auswertung der Kraft- und Wegmessdaten werden die Parameter der Sinusfunktionen (Gleichung 3-5 und Gleichung 3-6) mittels Minimierung der Fehlerquadratsumme aus den 15 Messwerten einer einzelnen Schwingung ermittelt:

$$F(t) = F_m + F_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_F) \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

- F(t): zeitabhängige, sinusförmige Kraftfunktion [N]
- F<sub>m</sub>: mittlere Kraft [N]
- F<sub>a</sub>: Kraftamplitude [N]
- φ<sub>F</sub>: Phasenverschiebung der Kraftschwingung [rad]

und

$$s(t) = s_m + s_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_s) \quad \text{Gleichung 3-6}$$

mit:

- s(t): zeitabhängige, sinusförmige Wegfunktion [mm]
- s<sub>m</sub>: mittlerer Weg [mm]
- s<sub>a</sub>: Wegamplitude [mm]
- φ<sub>s</sub>: Phasenverschiebung der Wegschwingung [rad]

Die im Probekörper auftretende Spannung ergibt sich aus Gleichung 3-7, die Einaxiale Dehnung ε aus Gleichung 3-8.

$$\sigma = \frac{F}{A_{PK}} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

$$\varepsilon = \frac{s}{L_0} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Für jeden Versuch werden die akkumulierte bleibende Dehnung ε<sub>akk,bl</sub> (Gleichung 3-9), die elastische Dehnung ε<sub>el</sub> (Gleichung 3-10), der Steifigkeitsmodul S<sub>Mix</sub> (Gleichung 3-11) und der Phasenwinkel zwischen Spannungs- und Dehnungssignal φ (Gleichung 3-12) berechnet.

$$\varepsilon_{akk,bl} = \varepsilon_m - \varepsilon_a \quad [-] \quad \text{Gleichung 3-9}$$

$$\varepsilon_{el} = \Delta\varepsilon = 2 \cdot \varepsilon_a \quad [-] \quad \text{Gleichung 3-10}$$

$$S_{Mix} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Gleichung 3-11}$$

$$\varphi = (\varphi_s - \varphi_F) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad \text{Gleichung 3-12}$$

Die Lastwechselzahl N<sub>Br</sub> bei Bruchversagen kann als Ermüdungskriterium verwendet werden.

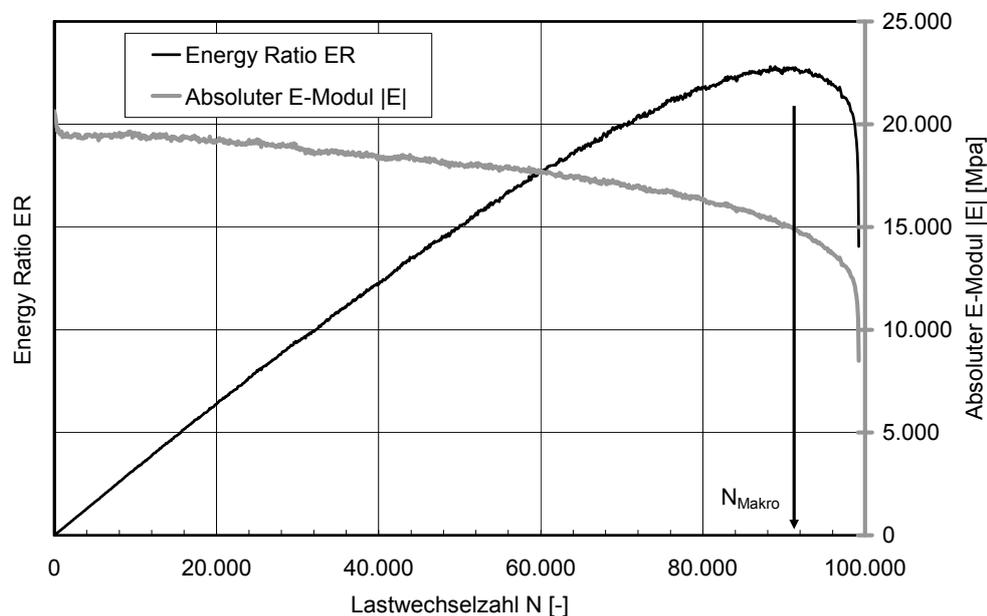
Ein weiteres Ermüdungskriterium basiert auf dem Verlauf der dissipierten Energie nach Van Dijk (1975) bzw. Hopman et al. (1989); siehe auch Rowe (1993) zur Auswertung von Spaltzug-Schwellversuchen.

Die „Energy Ratio“ ER ist das Verhältnis aus der am Versuchsanfang je Lastwechsel dissipierten Energie  $W_0$  und der dissipierten Energie  $W_n$  bei einem beliebigen Lastwechsel  $N$  (Gleichung 3-13). Durch die Annahme einer während des Versuchs konstanten Phasenverschiebung zwischen Spannungs- und Dehnungssignal verhält sich die ER proportional zum Produkt aus der Lastwechselzahl  $N$  und dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden absoluten E-Modul  $|E|_n$  (Gleichung 3-14):

$$ER(n) = \frac{n \cdot W_0}{W_n} = \frac{n \cdot (\pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin\varphi_0)}{\pi \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot \sin\varphi_n} \quad \text{Gleichung 3-13}$$

$$ER(n) \sim N \cdot |E|_n \quad \text{Gleichung 3-14}$$

In Abbildung 3-13 ist der Verlauf der ER als Funktion der Lastwechselzahl dargestellt. Die Lastwechselzahl, bei der ER einen Maximalwert erreicht, ist als Makrorisslastwechselzahl  $N_{\text{Makro}}$  definiert. Nach der zugrunde liegenden Schädigungstheorie vereinen sich zu diesem Zeitpunkt Mikrorisse zu einem ersten Makroriss, der folglich zum Bruch des Probekörpers führt.



**Abbildung 3-13. Ermittlung der bis zum Makroriss ertragbaren Lastwechselzahl  $N_{\text{Makro}}$  anhand der Energy Ratio ER (Konzept nach Rowe, 1993).**

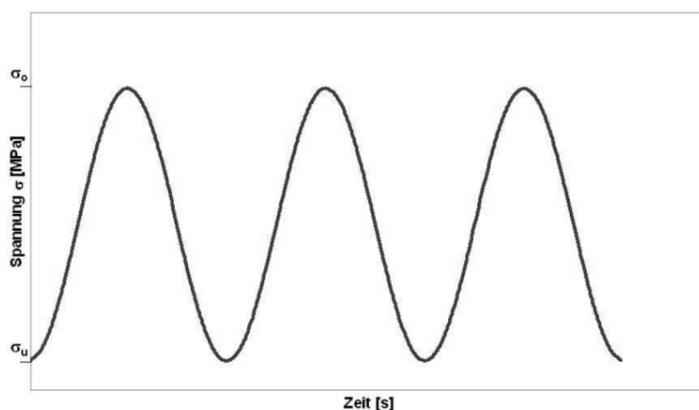
Folgende Ergebnisse des Zug-Schwellversuchs werden ausgewertet und dokumentiert:

- die jeweils beim 100. Lastwechsel gemessene elastische Anfangsdehnung  $\varepsilon_{el,anf}$ ,
- der Steifigkeitsmodul nach dem 100. Lastwechsel, repräsentiert durch  $|E|_{100}$  und  $\varphi_{100}$ ,
- die bis zum Makroriss ertragene Lastwechselzahl  $N_{Makro}$  und
- die Bruchlastwechselzahl  $N_{Bruch}$ .

Die bei ansonsten konstanten Prüfbedingungen ermittelten Wertepaare aus ertragbarer Lastwechselzahl ( $N_{Br}$  oder  $N_{Makro}$ ) und Beanspruchung ( $\Delta\sigma$  oder  $\Delta\varepsilon$ ) werden in log-log-Diagrammen aufgetragen und können mit spannungs- bzw. dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen in Form von Potenzfunktionen approximiert werden.

### 3.4.3.2 Spaltzug-Schwellversuch

Im Spaltzug-Schwellversuch gemäß der „Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen“, AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009a) wird ein auf der Mantelfläche liegender zylindrischer Probekörper über Lasteinleitungsstreifen mit einer sinusförmig schwellenden Druckkraft kraftgeregelt belastet. Dadurch wird in Probekörpermitte eine horizontal wirkende Zugspannung  $\sigma_{SZ}$  erzeugt. Die Prüftemperatur wird konstant mit  $T = 20\text{ °C}$  gewählt. Das Belastungsschema des Spaltzug-Schwellversuchs ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Die Unterspannung wird zur Lagesicherung des Probekörpers einheitlich mit 0,035 MPa festgelegt, die Oberspannung ist durch Vorversuche zu ermitteln.



**Abbildung 3-14: Schematische Belastungsfunktion (FGSV, 2009a).**

Anhand der während des Versuchs gemessenen elastischen Horizontalverformungen wird der Verlauf der Energy Ratio (ER) berechnet und die Lastwechselzahl  $N_{Makro}$  ermittelt, bei der die ER einen Maximalwert aufweist. Die dabei ermittelten Lastwechselzahlen werden in einem  $N_{Makro} - \varepsilon_{el,anf}$  - Diagramm aufgetragen und die Ermüdungsfunktion mittels Regression bestimmt (vgl. Abbildung 3-15).

$$N_{\text{Makro}} = C_1 \cdot \varepsilon_{\text{el,anf}}^{C_2}$$

Gleichung 3-15

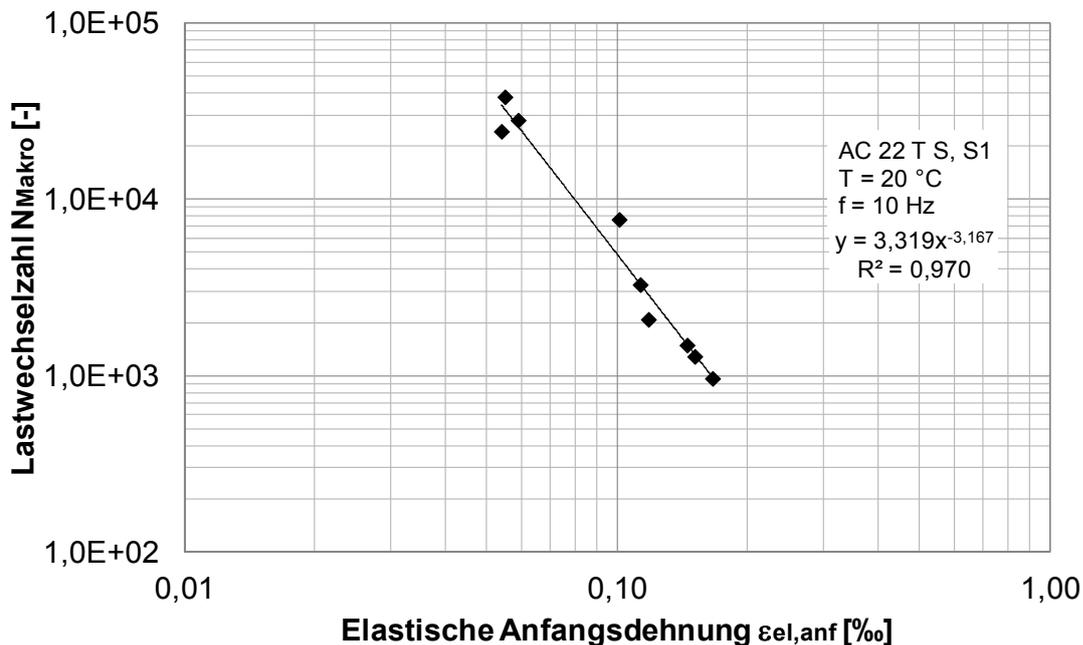


Abbildung 3-15. Beispiel für die Ableitung der Ermüdungsfunktion aus dem Spaltzug-Schwellversuch für ein Asphalttragschichtmischgut AC 22 T S.

#### 3.4.4 Komplexer dynamischer E-Modul

Die dimensionierungsrelevanten Steifigkeitsmoduln der Asphaltsschichten (Betrag des komplexen dynamischen E-Moduls) werden gemäß RDO Asphalt 09 (FGSV, 2009c) vorzugsweise aus Ergebnissen des Spaltzug-Schwellversuchs abgeleitet. Im Ausnahmefall darf eine Berechnung mittels des Verfahrens nach Francken und Verstraeten (1974) aus den kompositionellen Asphalteeigenschaften erfolgen.

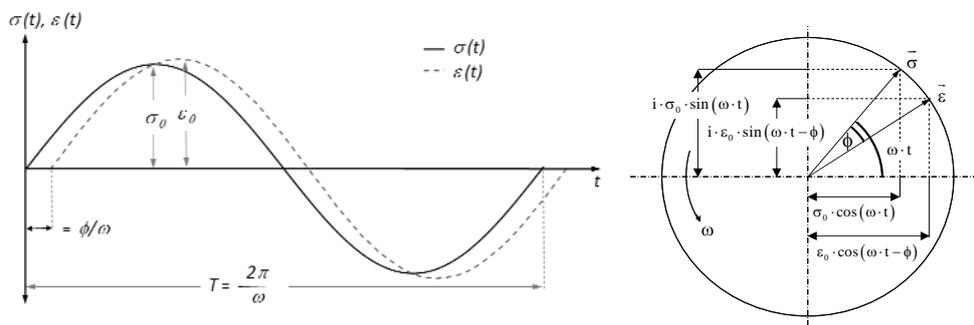
Die Ansprache des Steifigkeitsverhaltens von Asphalt erfolgt i. a. mit Hilfe von zyklisch-dynamischen Laborprüfungen. Üblicherweise wird als Belastungsform eine Sinusschwingung gewählt, deren Amplitude und Frequenz variiert wird. Sie gibt annähernd den realen Belastungsimpuls nach einer Fahrzeugüberfahrt wieder.

Grundsätzlich unterscheidet man *homogene Verfahren* mit einem homogenen Spannungs-Dehnungs-Zustand im Messbereich und *inhomogene Verfahren*, bei denen die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von einem Punkt des Probekörpers zum nächsten variieren. Zu den homogenen Verfahren zählen einaxiale Belastungsprüfungen an schlanken Probekörpern und Scherprüfungen. Biege- und indirekte Zugprüfungen sind den inhomogenen Verfahren zuzuordnen (Di Benedetto et al., 2001).

Die Ableitung von Steifigkeitsmoduln von Asphalt mit Hilfe inhomogener Verfahren wie dem Spaltzug-Schwellversuch ist zulässig, solange lineares visko-elastisches Materialverhalten angenommen werden kann. Die Ableitung des Steifigkeitsmoduls

von Asphalt mit Hilfe zyklisch-dynamischer Laborprüfungen begründet sich auf folgenden theoretischen Überlegungen (vgl. Wistuba et al., 2009).

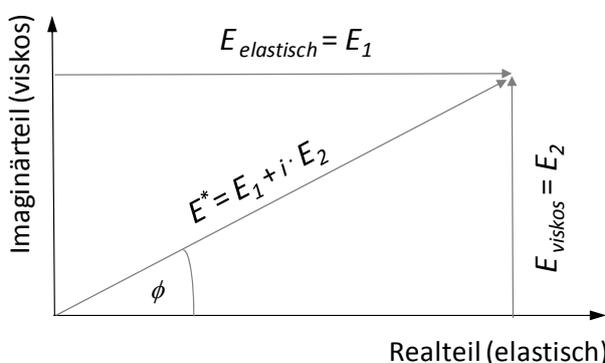
Bei einem linear visko-elastischen Material führt eine sinusförmige Erregung (mit der Kreisfrequenz  $\omega$  bzw. Frequenz  $f = \omega/2\pi$ ) zunächst zu einer sinusförmigen Beanspruchung  $\sigma(t)$  und in der Folge zu einer sinusförmigen Antwort  $\varepsilon(t)$ . Aufgrund der Visko-Elastizität läuft die Antwort der Erregung mit einer bestimmten Phasenverschiebung zeitlich nach (Abbildung 3-16). Der Phasenwinkel  $\phi$  ist ein Maß für die innere Reibung des Materials (Findley et al., 1976) und kann zur Abschätzung der dissipierten Energie pro Lastwechsel herangezogen werden. Der Phasenwinkel weist immer eine Größe von  $0 \leq \phi \leq \pi/2$  auf, wobei  $\phi = 0$  für rein elastisches Materialverhalten und  $\phi = \pi/2$  für viskoses gilt.



**Abbildung 3-16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für ein sinuserregtes linear visko-elastisches Material (links) und Darstellung von  $\sigma(t)$  und  $\varepsilon(t)$  in der komplexen Zahlenebene (rechts) (Wistuba et al., 2009).**

Der komplexe Modul kann in einen Realteil  $E_1$  (Speichermodul) und einen Imaginärteil  $E_2$  (Verlustmodul) zerlegt werden (Abbildung 3-17). Der Betrag des komplexen dynamischen Moduls  $|E^*|$  zusammen mit dem Phasenwinkel  $\phi$  wird als (dynamischer) Steifigkeitsmodul bezeichnet. Es folgt:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos\phi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot i \cdot \sin\phi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad \text{Gleichung 3-16}$$



**Abbildung 3-17: Zerlegung des komplexen Moduls in einen Realteil  $E_1$  (Speichermodul) und einen Imaginärteil  $E_2$  (Verlustmodul) in der komplexen Zahlenebene (Wistuba et al., 2009).**

Die Ermittlung der Materialsteifigkeit erfolgt bei kleinen Amplituden und mit einer geringen Anzahl an Belastungszyklen (100 Lastwechsel), um eventuell auftretende, prüfbedingte Einflüsse auf die Materialschädigung zu vermeiden.

Der Steifigkeitsmodul von linear visko-elastischen Materialien kann aus den Amplituden von Kraft (Spannung  $\sigma_0$ ) und Weg bzw. Durchbiegung (Dehnung  $\varepsilon_0$ ) berechnet werden. In Abhängigkeit des gewählten Prüfverfahrens fließen folgende Korrekturfaktoren in die Berechnung ein. Ein Formfaktor  $\gamma$  berücksichtigt die Probekörpergeometrie, ein Massenfaktor  $\mu$  die Massenträgheitseffekte des Probekörpers und der mit-schwingenden Geräteteile.

Vorausgesetzt die Steifigkeitsprüfung wird richtig durchgeführt und interpretiert, besteht zwischen unterschiedlichen Prüfverfahren eine hohe Konsistenz, so dass im Wesentlichen jedes beliebige Prüfverfahren zur Ableitung der Materialsteifigkeit herangezogen werden kann (Di Benedetto et al., 2001).

Beim Spaltzug-Schwellversuch wird die zu untersuchende Asphaltvariante nacheinander bei den Temperaturen 20°C, 10°C, 0°C und -10°C jeweils an drei Probekörpern zyklisch-dynamisch mit verschiedenen Frequenzen, z. B. 0,1 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz beansprucht. Aus den gewonnenen Kenndaten kann daraufhin die Masterkurve abgeleitet werden. Diese gibt, basierend auf den Annahmen der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz, die Steifigkeit des untersuchten Asphalttes bezüglich der Temperatur wieder.

Die Höhe der Dehnungsreaktion infolge einer äußeren Beanspruchung hängt bei viskoelastischen Baustoffen auch von der aufgebrachten Frequenz  $f$  ab. Wird ein Baustoff bei hoher Frequenz belastet so ist die resultierende Dehnungsreaktion kleiner als bei äquivalenter Beanspruchung mit geringerer Frequenz. Beim Prinzip der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz für die Ermittlung des E-Moduls wird angenommen, dass für eine bestimmte Kombination aus Frequenz und Temperatur ein E-Modul abgeleitet werden kann, welcher bei einer weiteren Kombination aus Frequenz und Temperatur auftreten kann.

Hürtgen (2000) ermittelte gleichgroße E-Moduln eines Materials bei unterschiedlichen Prüftemperaturen und Frequenzen. Dieses Erkenntnis wird für Laborprüfungen genutzt, indem die Ergebnisse gewählter Temperatur-Frequenz-Paare entlang einer Masterfunktion auf andere Temperatur-Frequenz-Bereiche ausgeweitet werden (vgl. Abbildung 3-18).

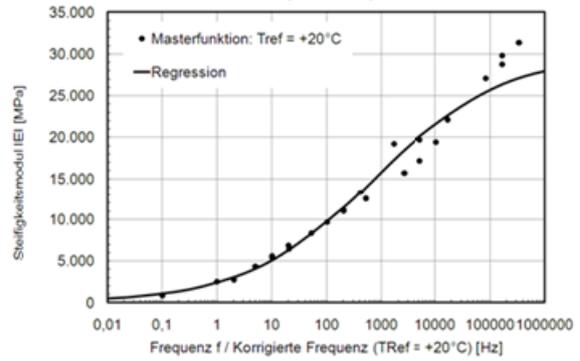
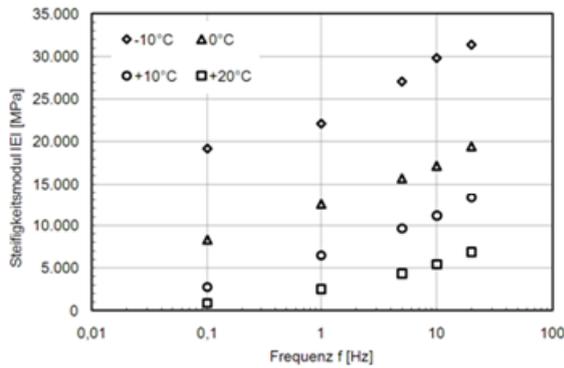


Abbildung 3-18: Ermittlung einer Masterkurve nach Hürtgen (Grönniger und Walther, 2011).

Unter Zuhilfenahme des Verschiebungsfaktors  $\alpha_T$  nach Gleichung 3-17 kann die jeweilige Prüffrequenz zur korrigierten Frequenz  $f_R$  nach Gleichung 3-18 überführt werden. Die gemessenen E-Moduln lassen sich durch Gleichung 3-19 approximieren.

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m \cdot \left( \frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_R+273} \right)}} \quad \text{Gleichung 3-17}$$

$$f_R = f \cdot \alpha_T \quad \text{Gleichung 3-18}$$

$$|E| = y_0 + \frac{w}{1 + e^{-\left( \frac{\ln(f_R) - x_0}{z} \right)}} \quad \text{Gleichung 3-19}$$

mit:

- T tatsächliche Prüftemperatur [°C]
- $T_R$  Bezugstemperatur [°C]
- m Faktor [°C]
- w Glasmodul [MPa]; bei tiefer Temperatur und hoher Frequenz maximal erreichbarer Steifigkeitsmodul
- $y_0, x_0, z$  Regressionskoeffizienten

### 3.5 Laborprüfungen zur Ansprache der Bitumeneigenschaften

Die Ansprache der Bitumeneigenschaften erfolgt mittels konventionellen und rheologischen Laborprüfungen. Die konventionellen Bitumeneigenschaften werden bestimmt mittels

- Erweichungspunkt Ring und Kugel ( $EP_{RuK}$ ) gemäß Prüfnorm DIN EN 1426 und
- Nadelpenetration (Pen) gemäß Prüfnorm DIN EN 1427.

Die Ansprache der rheologischen Bitumeneigenschaften erfolgt mittels

- BBR-Analytik mittels Biegebalkenrheometer (BBR) gemäß Prüfnorm DIN EN 14771,
- Oszillation mittels dynamischem Scherrheometer (DSR) gemäß Prüfnorm DIN EN 14770 und
- Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT) mittels DSR.

#### 3.5.1 Biegebalkenrheometrie (BBR-Analytik)

Die BBR-Analytik wird angewendet, um die Kälteeigenschaften von Bindemitteln anzusprechen.

Für diese Prüfung werden Bitumenbalken hergestellt und in einer Dreipunkt-Biegevorrichtung bei den Temperaturen  $T = -16\text{ °C}$  und  $T = -10\text{ °C}$  für die Zeitdauer von 240 s statisch (kraft geregelt) belastet. Die Durchbiegung des Balkens wird kontinuierlich gemessen und die Biegekriechsteifigkeit  $S$  gegenüber der Belastungszeit jeweils im logarithmischen Maßstab aufgezeichnet. Die der Belastungszeit von 60 s zugehörige Tangentenneigung der Kriechkurve wird berechnet und als  $m$ -Wert angegeben.

Im Regelfall werden für die betrachtete Temperatur die Biegekriechsteifigkeit  $S$  nach 60 s und der zugehörige  $m$ -Wert angegeben. Anhand der bei den unterschiedlichen Prüftemperaturen bestimmten Biegekriechsteifigkeiten wird die Temperatur ermittelt, die sich bei einer Biegekriechsteifigkeit von 300 MPa ergibt.

#### 3.5.2 Oszillationsmessung im Dynamischen Scherrheometer (DSR-Analytik)

Im Rahmen der DSR-Analytik wird eine Bindemittelprobe einer oszillierenden Scherbeanspruchung ausgesetzt und dabei Anhaltswerte für die Verformungseigenschaften ( $G^*/\sin \delta$ ) und die Ermüdungseigenschaften ( $G^* \cdot \sin \delta$ ) erhalten. Folgende Prüfbedingungen sind definiert:

(a) Temperaturbereich  $+30\text{ °C}$  bis  $+90\text{ °C}$ : Es wird ein Temperatursweep im Bereich von  $+30\text{ °C}$  bis  $+90\text{ °C}$  und ein Frequenzsweep im Bereich von 0,1 Hz bis 10 Hz durchgeführt.

(b) Temperaturbereich von  $-25\text{ °C}$  bis  $-10\text{ °C}$ : In Analogie zur BBR-Analytik werden die Bitumenproben auf die 3 Temperaturen  $T = -10\text{ °C}$ ,  $-16\text{ °C}$  und  $-25\text{ °C}$  abgekühlt. Nach Beendigung der Temperierphase wird ein Frequenzsweep im Bereich von

0,01 Hz bis 10 Hz durchgeführt. Daran anschließend werden der komplexe Schermodul  $G^*$  und der Phasenwinkel  $\delta$  ausgewertet.



**Abbildung 3-19. Dynamisches Scherrheometer (DSR) mit Prüfgeometrie eines Platte-Platte-Mess-Systems mit einem Plattendurchmesser von 25 mm für den Temperaturbereich von +30 °C bis +90 °C.**

Als Ergebnis werden die Zusammenhänge  $G^*$ ,  $\delta$ , Frequenz und Temperatur in verschiedenen Kombinationen grafisch dargestellt, wie z. B. Schermodul gegen Frequenz (Masterfunktion), Schermodul gegen Phasenwinkel (Black-Diagramm) und Imaginärteil  $G''$  gegen den Realteil  $G'$  (Cole-Cole Diagramm).

### 3.5.3 Kriech- und Relaxationsverhalten im Multiple Stress Creep and Recovery Test

Beim Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT) wird eine Bitumenprobe einer wiederholten statischen Kriechbeanspruchung mit Erholungsphasen ausgesetzt (Abbildung 3-20). Die entsprechend der DSR-Analytik vorbereitete Probe (gemäß DIN EN 14770) wird für eine Zeitdauer von 1 s mit einer Scherbelastung beansprucht und anschließend für eine Dauer von 9 s entlastet. Dabei wird als Prüfgeometrie ein Platte-Platte-Mess-System mit Plattendurchmesser 25 mm und einer Spaltweite von 1 mm verwendet.

Der MSCRT-Test wird gemäß der Arbeitsanleitung AL MSCRT-Prüfung (DSR) (FGSV, 2012) in drei Laststufen (0,1; 1,6; 3,2 kPa) mit jeweils 10 Zyklen bei einer konstanten Temperatur von  $T = 60\text{ °C}$  durchgeführt. Die Gesamtdauer der Prüfung beträgt 300 s.

Mindestens alle 0,10 s werden während der Kriechbelastung Spannung und Verformung aufgezeichnet und mindestens alle 0,45 s in der Entlastungsphase. Zusätzlich werden die Daten zu den Zeitpunkten 1,00 s und 10,00 s für jeden einzelnen Lastzyklus aufgezeichnet. Zur Auswertung wird die Spannungs-Erholungs-Kurve der 10 aufeinanderfolgenden Zyklen für jede der drei Kriechspannungen in einem Diagramm dargestellt (Abbildung 3-21).

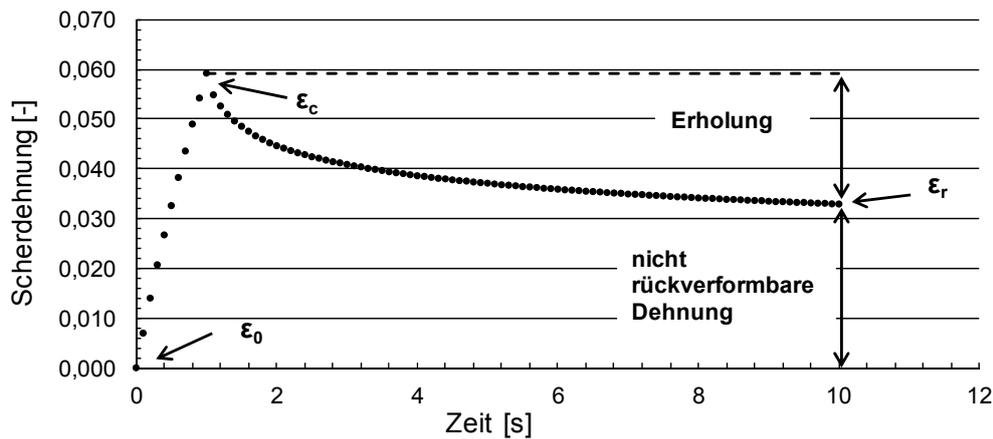


Abbildung 3-20. Beispiel einer Belastungs- und Erholungsphase im Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT).

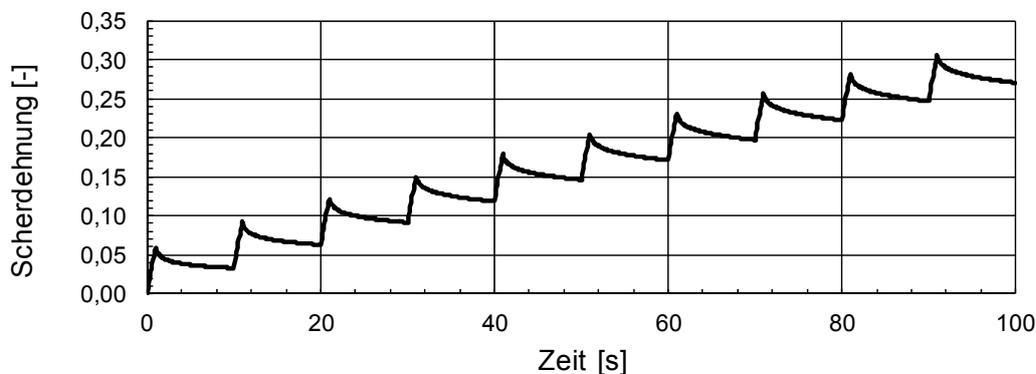


Abbildung 3-21. Beispiel eines Belastungs- und Erholungsverlaufes nach 10 aufeinanderfolgenden Zyklen im Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT).

Für jede Laststufe und jeden Lastzyklus sind zu ermitteln:

- die gemessene Dehnung zu Beginn der Kriechbelastung,
- die gemessene Dehnung nach 1 s,
- die gemessene Dehnung nach 10 s,
- die eingestellte Dehnung am Ende der Kriechbeanspruchung
- und die eingestellte Dehnung am Ende der Erholungsphase.

Mit den erhaltenen Ergebnissen werden die durchschnittliche prozentuale Erholung und der nicht rückverformbare Anteil des Straßenbaubitumens (oder des Polymer-modifizierten Bitumens) bestimmt. Die durchschnittliche prozentuale Erholung für jeden der 10 Zyklen pro Laststufe,  $N = 1$  bis 10, kann wie folgt berechnet werden:

$$R_N = \left( \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{10}}{\epsilon_1} \right) \cdot 100. \quad \text{Gleichung 3-20}$$

Die durchschnittliche prozentuale Erholung für die Kriechbelastung von 0,10 kPa ergibt sich zu:

$$R_{0,1\text{kPa}} = \sum \frac{R_N}{10} \quad \text{für } N = 1 \text{ bis } 10. \quad \text{Gleichung 3-21}$$

Für jeden der zehn Zyklen,  $N = 1$  bis  $10$ , pro Kriechspannung wird außerdem der nicht rückverformbare Anteil  $J_{nr}$  berechnet. Dafür wird die verbleibende Verformung eines Probekörpers nach einem Kriech- und Erholungszyklus durch die aufgebrauchte Spannung dividiert. Der durchschnittliche nicht rückverformbare Anteil für die Kriechbelastung von  $0,10$  kPa ergibt sich zu:

$$J_{nr}(0,1\text{kPa}) = \sum \frac{\varepsilon_{10}}{0,1} \quad \text{Gleichung 3-22}$$

### 3.6 Rechnerische Lebensdauer

Auf der Grundlage des ermittelten Ermüdungsverhaltens der Tragschicht-Varianten und der im Technischen Regelwerk dokumentierten Methode zur Rechnerischen Dimensionierung (RDO Asphalt 09; FGSV, 2009c) wird die rechnerische Lebensdauer von daraus hergestellten Straßenaufbau-Varianten ermittelt.

#### 3.6.1 Berechnungsgrundlagen

Der rechnerische Nachweis des Ermüdungsverhaltens der Asphalttragschicht beruht gemäß Technischem Regelwerk (RDO Asphalt 09; FGSV, 2009c) auf einer Begrenzung der Biegezug-Beanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht (klassische Ermüdungstheorie). Zur Berechnung der maßgebenden Dehnungen bzw. Spannungen (sog. Primärwirkungen) an der Unterseite der Asphalttragschicht wird die linear-elastische Mehrschichtentheorie angewendet. Hier wird der Fahrbahnoberbau in homogene Schichten eingeteilt. Jede Schicht wird durch die Eigenschaften Dicke  $h$ , Elastizitätsmodul  $E$ , Querdehnzahl  $\nu$  und Verbund zu der darunter liegenden Schicht beschrieben. Die unterste Schicht eines Mehrschichtensystems wird mit einem als Halbraum definierten Untergrund festgelegt. Für die Berechnung der auftretenden Beanspruchungen aus der Verkehrslast  $p$  wird im Modell die Radlast durch eine runde, auf der Oberfläche vertikal angreifende Flächenlast (Topflast) angenähert.

Zur Berücksichtigung der jeweiligen temperaturabhängigen Steifigkeit der Asphalt-schichten werden gem. gültigem Regelwerk 13 Temperaturklassen berücksichtigt, welche die statistische Verteilung der Asphaltoberflächentemperaturen im Jahresverlauf repräsentieren (gem. Kayser, 2007).

Der Temperaturverlauf im Asphalt wird durch Gleichung 3-23 bestimmt. Jeder im Mehrschichten-Modell definierten Asphalt-schicht bzw. -lage kann somit eine Temperatur zugeordnet werden, anhand der entsprechende E-Modul der Schicht abgeleitet werden kann. Die benötigte Temperatur-Steifigkeitsfunktion wird je Asphaltmischgut mittels Laborprüfungen bestimmt.

$$y = b \cdot \ln(0,01 \cdot x + 1,0) + T$$

Gleichung 3-23

mit:

y	Asphalttemperatur in der Tiefe x [°C]
x	Tiefe unter Fahrbahnoberfläche [mm]
T	Oberflächentemperatur [°C]
b	Parameter, abhängig von T [-]

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Achslasten im Fahrzeugkollektiv werden bis zu 11 Achslastklassen definiert, deren Anteil am Gesamtverkehr in Abhängigkeit der Straßenklasse definiert ist (Tabelle 3-6).

**Tabelle 3-6: Achslastklasse und zugeordnete Häufigkeit (Uhlig, 2007)**

Bezeichnung	Achslastklasse (statische Last) [t]										
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	≥20
<b>BAB Fernverkehr *)</b>	2,8396	21,4670	26,4848	30,7195	11,7032	4,9098	1,6540	0,2087	0,0126	0,0007	0,0001
<b>BAB Mischverkehr **)</b>	3,4940	24,9439	27,4935	26,3373	11,0538	4,6596	1,7180	0,2711	0,0257	0,0031	-
<b>BAB Stadtnaher Verkehr ***)</b>	4,0101	36,7995	29,3512	17,1376	7,5290	3,8888	1,1408	0,1399	0,0031	-	-

- ) Fernverkehr entspricht der Verbindungsfunktionsstufe 0 und I, „kontinental / großräumig“ nach den Richtlinien zur Anlage von Landstraßen RAL bzw. Richtlinien zu Anlage von Autobahnen RAA
- ) Mischverkehr entspricht der Verbindungsstufe II „überregional“ nach den RAL / RAA
- ) Stadtnaher Verkehr entspricht der Verbindungsstufe III „regional“ nach den RAL / RAA

Über die angestrebte Lebensdauer und das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen des Schwerverkehrs DTV<sup>(SV)</sup> wird die Anzahl an Achsübergängen prognostiziert, die innerhalb der definierten, theoretischen Lebensdauer zu erwarten sind (vorh N).

Es ergeben sich somit insgesamt bis zu 143 einzelne Mehrschichten-Modelle oder Bemessungsfälle. Für jeden Bemessungsfall sind die Primärwirkungen an der Unterseite der Asphalttragschicht zu berechnen.

### 3.6.2 Anzahl der zulässigen Lastwechsel

Anhand der mit Spaltzug-Schwellversuchen an dem entsprechenden Asphalttragschichtmaterial ermittelten Ermüdungsfunktion (gem. AL SP-Asphalt 09) wird die für jede berechnete Dehnung ertragbare zulässige Lastwechselzahl abgeleitet:

$$\text{zul}N = \frac{SF}{F} \cdot a \cdot \epsilon^k$$

Gleichung 3-24

mit:

zul N	zulässige Lastwechselzahl bis zur Rissentstehung in den Asphalttragschichten [-]
a	Materialkennwert, durch Regression bestimmt [-]
$\epsilon$	elastische Anfangsdehnung (nach dem 100. Lastzyklus) [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
k	Materialkennwert, durch Regression bestimmt [-]
SF	Shiffaktor, für den Spaltzug-Schwellversuch gem. RDO ist ein Faktor von SF = 1.500 anzunehmen [-]
F	Sicherheitsbeiwert gem. RDO [-]

### 3.6.3 Nachweis der Gebrauchsdauer

Unterschiedliche Achslasten und unterschiedliche Temperaturzustände führen zu variierenden Beanspruchungszuständen an der Unterseite der Asphalttragschicht. So kann für jeden zu berücksichtigenden Belastungsfall, unter Verwendung von Gleichung 3-24, eine zulässige Lastwechselzahl  $\text{zul} N$  ermittelt werden. Diese wird in der Folge den vorhandenen Lastwechseln  $\text{vorh} N$  gegenübergestellt. Der Quotient aus  $\text{vorh} N$  und  $\text{zul} N$  wird als Teilschädigung interpretiert und mittels der Schadensakkumulations-Hypothese nach Miner (1945) zur Gesamtschädigung summiert. Der Nachweis gegenüber Ermüdung gilt als erfüllt, wenn die Summe der Teilschädigungen den Wert 1,0 nicht überschreitet (vgl. Gleichung 3-25).

$$\sum_{\text{MINER}} = \frac{\text{vorh..}N_a}{\text{zul..}N_a} + \frac{\text{vorh..}N_b}{\text{zul..}N_b} + \frac{\text{vorh..}N_c}{\text{zul..}N_c} + \dots + \frac{\text{vorh..}N_n}{\text{zul..}N_n} \leq 1$$

Gleichung 3-25

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Asphaltmischguteigenschaften

Die Untersuchungsergebnisse für die zwei Mischgut-Varianten sind im Folgenden dargelegt.

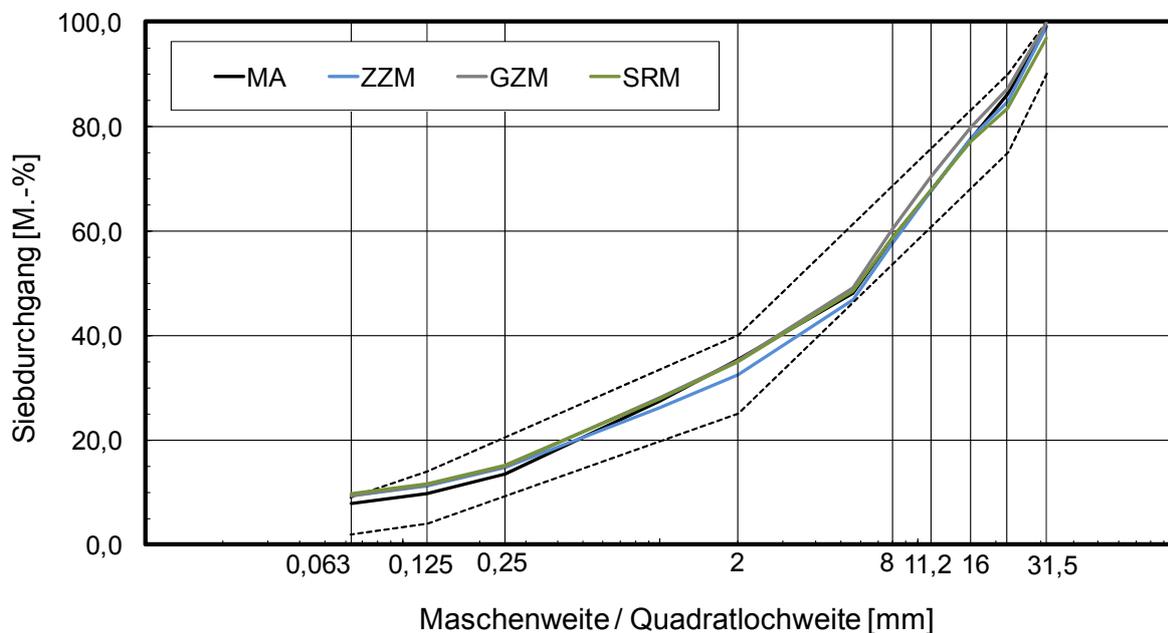
#### 4.1.1 Zusammensetzung der Mischgut-Varianten

##### 4.1.1.1 Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

Die Korngrößenverteilungen der Mischgut-Varianten AC 32 T S sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 4-1 angegeben. Abbildung 4-1 zeigt am Beispiel der Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulatzugabe die angestrebte und die erreichten Korngrößenverteilungen im Vergleich mit dem zulässigen Sieblinienbereich gemäß TL Asphalt-StB 07.

**Tabelle 4-1: Zusammensetzung der hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T S bei Warmzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte)**

Korn-durch-messer [mm]	Siebdurchgang [M.-%]												
	0 M.-% AG			40 M.-% AG			50 M.-% AG				60 M.-% AG		
	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM	MA	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM
31,5	98,5	100	100	99,9	99,9	100	99,1	99,5	96,8	96,9	99,3	99,0	98,5
22,4	86,7	85,0	87,9	86,9	85,0	91,0	86,2	86,7	84,8	83,4	85,9	84,7	87,2
16	77,3	75,5	82,4	77,4	78,1	83,0	77,5	78,2	77,5	77,2	78,3	77,5	78,0
11,2	66,1	65,7	73,9	68,2	68,4	72,7	67,6	67,1	68,3	67,9	67,7	67,8	65,5
8	54,9	55,1	64,4	59,2	59,6	63,9	58,7	57,1	58,7	58,7	58,0	58,4	54,7
5,6	47,0	46,0	53,2	49,0	49,3	53,5	48,2	46,3	47,8	48,5	47,4	47,6	43,3
2	33,7	33,5	38,5	35,0	35,8	38,3	35,5	32,2	34,3	35,0	33,3	33,6	30,5
1	27,2	26,2	30,6	28,2	28,5	30,6	27,6	26,2	27,4	27,8	27,0	26,5	24,6
0,25	12,6	11,8	13,0	15,5	14,6	16,0	13,5	14,8	14,6	15,2	15,8	14,4	13,7
0,125	8,9	8,2	9,1	11,9	11,1	12,4	9,7	11,4	11,3	11,7	12,3	10,9	10,2
0,063	7,0	6,5	7,2	9,9	9,3	10,4	7,8	9,5	9,2	9,8	10,3	8,9	7,6



**Abbildung 4-1. Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulatzugabe der Mischgut-Varianten AC 32 T S.**

Die erzielten Korngrößenverteilungen entsprechen weitestgehend der angestrebten Soll-Sieblinie der großtechnisch hergestellten Asphalttragschicht-Variante (MA).

Tabelle 4-2 fasst die Ergebnisse der Kontrollprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S zusammen.

**Tabelle 4-2: Kontrollprüfungsergebnisse für die Mischgut-Varianten AC 32 T S (Mittelwerte)**

	0 M.-% AG			40 M.-% AG			50 M.-% AG				60 M.-% AG		
	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM	MA	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM
Bindemittelgehalt B [M.-%]	4,3	4,4	4,7	4,4	4,4	4,8	4,3	4,4	4,4	4,5	4,4	4,4	4,4
Rohdichte $\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,537	2,549	2,530	2,568	2,557	2,550	2,565	2,578	2,561	2,560	2,581	2,578	2,580
Erweichungspunkt EPRuK [°C]	59,6	62,2	58,6	59,8	60,0	59,6	61,6	60,2	60,2	59,8	62,0	61,2	63,4

#### 4.1.1.2 Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)

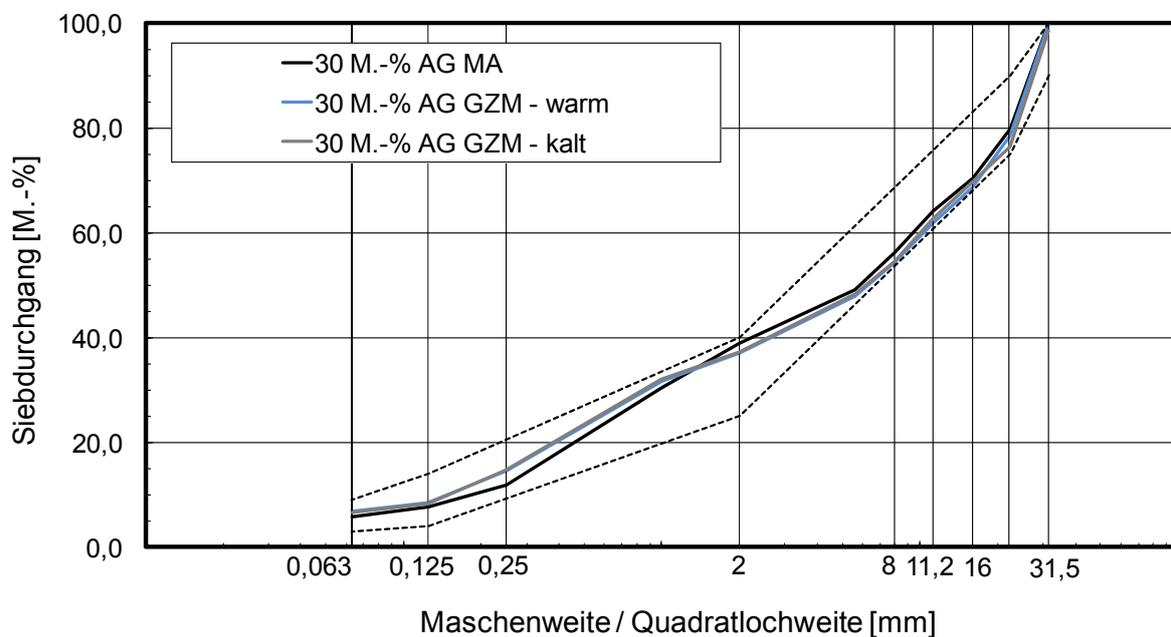
Die Korngrößenverteilungen der Mischgut-Varianten AC 32 T N sind anhand der Siebdurchgänge in Tabelle 4-3 angegeben. Abbildung 4-2 zeigt am Beispiel der Asphalttragschicht-Varianten mit 30 M.-% Asphaltgranulatzugabe die angestrebte und die erreichten Korngrößenverteilungen sowie den zulässigen Sieblinienbereich gemäß TL Asphalt-StB 07.

Die erzielten Korngrößenverteilungen entsprechen weitestgehend der angestrebten Sieblinie der großtechnisch hergestellten Asphalttragschicht-Variante (MA).

Tabelle 4-2 fasst die Ergebnisse der Kontrollprüfungen der Mischgut-Varianten AC 32 T N zusammen.

**Tabelle 4-3: Zusammensetzungen der hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T N bei Kaltzugabe des Asphaltgranulats (Mittelwerte)**

Korndurchmesser [mm]	Siebdurchgang [M.-%]							
	0 M.-% AG	20 M.-% AG		30 M.-% AG			40 M.-% AG	
	GZM	GZM warm	GZM kalt	MA	GZM warm	GZM kalt	GZM warm	GZM kalt
31,5	100,0	100,0	99,2	100,0	99,7	98,4	100,0	99,4
22,4	74,3	77,3	77,1	79,9	78,5	76,3	77,7	77,6
16	67,9	69,1	69,3	70,4	68,7	69,9	68,9	70,1
11,2	62,8	62,4	63,0	64,1	61,8	62,8	61,8	61,7
8	55,7	54,3	54,6	56,2	54,3	54,6	54,5	53,6
5,6	49,6	47,9	48,3	49,1	48,0	48,2	49,2	47,0
2	37,3	37,2	37,2	39,0	37,0	37,4	38,5	36,7
1	32,6	32,0	32,1	30,4	31,7	32,2	32,6	31,2
0,25	14,0	14,6	14,5	11,9	14,5	14,7	14,8	14,6
0,125	6,9	8,3	8,0	7,6	8,4	8,3	8,8	8,6
0,063	5,5	6,8	6,5	5,9	6,8	6,7	7,2	7,0



**Abbildung 4-2. Mittlere Korngrößenverteilungen (Kontrollprüfung) für die Asphalttragschicht-Varianten mit 30 M.-% Asphaltgranulatzugabe der Mischgut-Varianten AC 32 T N.**

**Tabelle 4-4: Kontrollprüfungsergebnisse der Mischgut-Varianten AC 32 T N (Mittelwerte)**

Korndurchmesser [mm]	Siebdurchgang [M.-%]							
	0 M.-% AG	20 M.-% AG		30 M.-% AG			40 M.-% AG	
	GZM	GZM warm	GZM kalt	MA	GZM warm	GZM kalt	GZM warm	GZM kalt
Bindemittelgehalt B [M.-%]	3,9	3,9	4,0	3,7	3,8	3,9	3,9	3,9
Rohdichte $\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,646	2,648	2,653	2,660	2,654	2,658	2,642	2,652
Erweichungspunkt EP <sub>RuK</sub> [°C]	56,8	52,8	54,2	55,6	54,4	54,6	56,0	57,4

## 4.1.2 Gebrauchsverhaltensorientierte Eigenschaften

### 4.1.2.1 Verformungsverhalten im Dynamischen Stempeleindringversuch

#### a) Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

In Tabelle 4-5 sind die Ergebnisse aus dem dynamischen Stempeleindringversuch für die Mischgut-Varianten AC 32 T S angegeben.

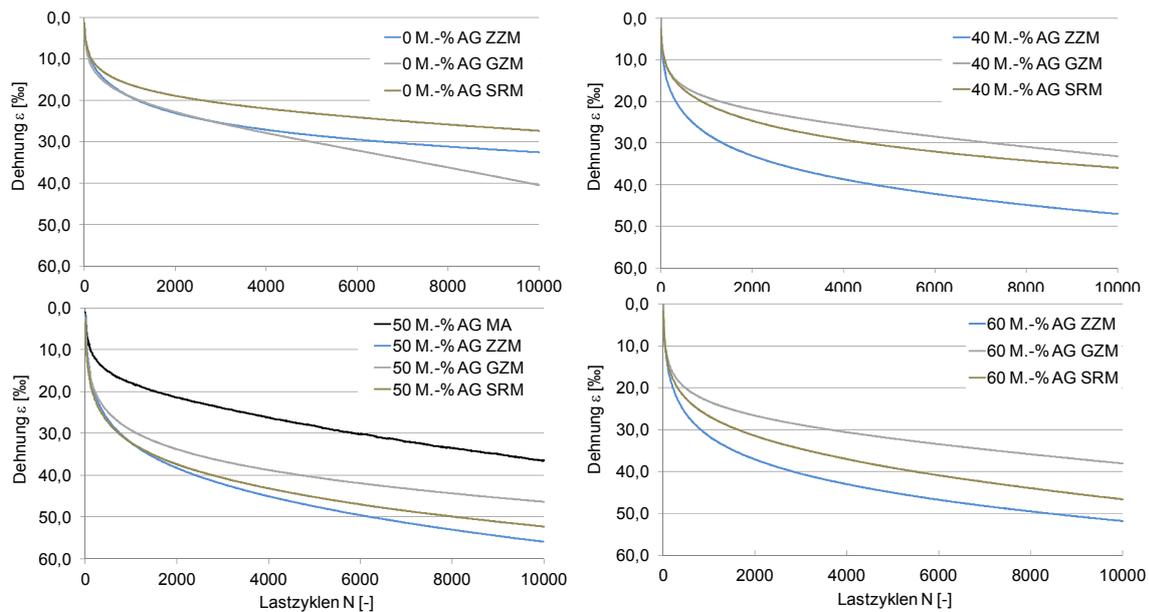
**Tabelle 4-5: Ergebnisse der Verformungsprüfung der Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels dynamischem Stempeleindringversuch (Mittelwerte)**

Anteil Asphaltgranulat [M.-%]	Mischer	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Dehnung [%]	akkumulierte plastische Verformung [mm]	Dehnungsrate [% $\cdot 10^{-4}/n$ ]
0	ZZM	10000	32,54	2,73	10,83
	GZM	9166	38,30	3,28	20,63
	SRM	10000	27,35	2,31	7,39
40	ZZM	10000	47,04	3,87	10,37
	GZM	10000	33,63	33,17	2,86
	SRM	10000	35,95	3,05	11,74
50	In situ	-	-	-	-
	MA	10000	36,98	3,11	17,15
	ZZM	10000	56,06	4,65	14,94
	GZM	10000	46,92	3,96	12,04
60	SRM	10000	52,30	53,68	4,37
	ZZM	10000	51,79	4,25	17,02
	GZM	10000	42,95	3,63	10,90
	SRM	10000	46,61	3,87	17,62

Abbildung 4-3 zeigt die unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulats und des Mischertyps erhaltenen Kriechkurven. Dabei ist festzustellen, dass die mittels GZM hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T S im Vergleich zu den anderen Labormischverfahren tendenziell bessere Werte aufweisen (vgl. Abbildung 4-3).

Bei Betrachtung des Referenzmischgutes ohne Zugabe von Asphaltgranulat (0 M.-% AG) ist beim GZM ein Wendepunkt zu erkennen, der auf eine verschlechterte Verformungsbeständigkeit hindeutet (Abbildung 4-3, oben links).

Bei Verwendung von 50 M.-% Asphaltgranulat im Asphalttragschichtmischgut zeigt die in der Mischanlage (MA) hergestellte Asphalttragschicht-Variante den besten Verformungswiderstand.

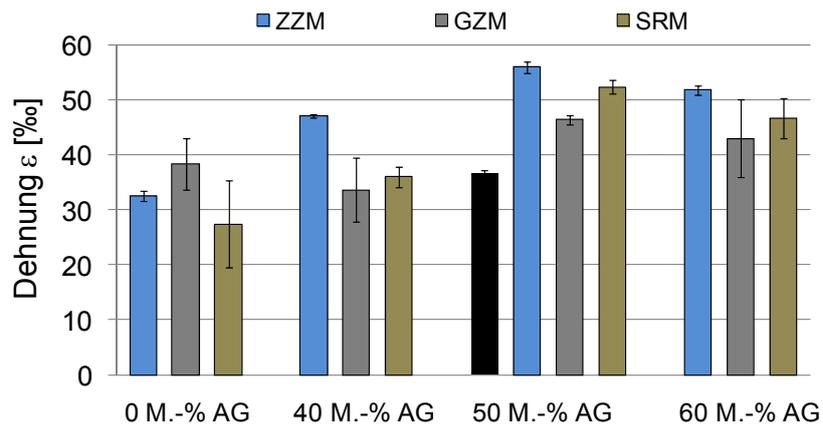


**Abbildung 4-3. Kriechkurven aus dem Stempel Eindringversuch der Mischgut-Varianten AC 32 T S unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und des Labormischverfahrens.**

In Abbildung 4-4 ist keine einheitliche Reihung der Labormischverfahren hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit erkennbar. (Gemäß TP Asphalt, Teil 25 A 2 sind die Ergebnisse für die plastische Dehnung  $\epsilon$  [%] und die akkumulierte bleibende Verformung [mm] nach Versuchsende als Mittelwertbildung aus einer 2-fachen Versuchsbelegung anzugeben).

Abbildung 4-4 zeigt die gemittelten Dehnungen mit Spannweite der einzelnen Asphalttragschicht-Varianten. Auffällig sind die geringen Spannweiten der mittels Zweiwellen-Zwangsmischer hergestellten Asphalttragschicht-Varianten. Dies deutet auf einen wiederholbaren, homogenen Mischprozess hin, der durch andere Labormischverfahren nur annähernd erreicht wird.

Überschneiden sich die Spannweiten der eingesetzten Labormischer je Untersuchungsvariante, unterscheiden sich statistisch die Varianten nicht. So weisen die Verformungen der Varianten mit 0 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulatzugabe vergleichbare Größenordnungen auf. Lediglich bei 50 M.-% Asphaltgranulatzugabe kommt es zu keiner Überschneidung.

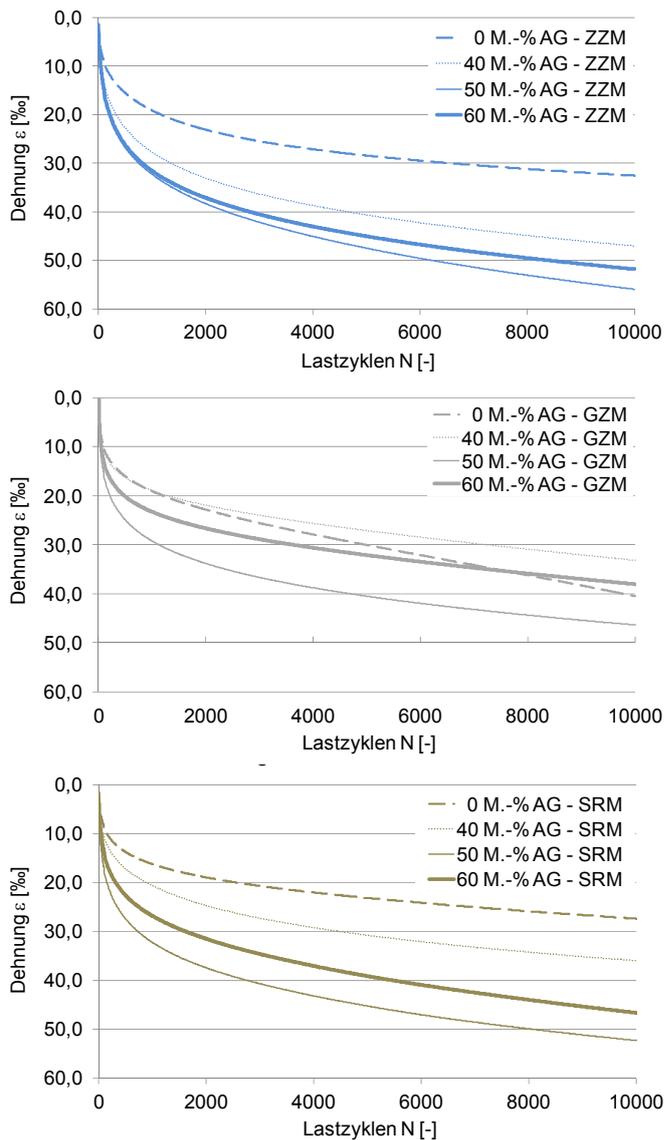


**Abbildung 4-4. Dehnung aus dem Stempelindringversuch bei Versuchsende mit Spannweite für die Mischgut-Varianten AC 32 T S .**

Es wird festgehalten, dass keine einheitliche Reihung der Labormischverfahren feststellbar ist.

Abbildung 4-5 zeigt die Kriechkurven aus dem Stempelindringversuch der Mischgut-Varianten AC 32 T S unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und des Labormischverfahrens. In blau sind die mittleren Kriechkurven des mittels Zweiwellen-Zwangsmischer (ZMZ), in grau die mittels Gegenlauf-Zwangsmischer (GZM) und in oliv die mittels Schlag- und Rührmischer (SRM) hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten dargestellt.

Bei allen Labormischverfahren ist ein Einfluss des Asphaltgranulatanteils auf die Verformungseigenschaften erkennbar. Mit Ausnahme der Asphalttragschicht-Variante 0 M.-% AG mittels GZM kann folgende einheitliche Reihung hinsichtlich einer guten Verformungsbeständigkeit ermittelt werden: 0 M.-% AG > 40 M.-% AG > 60 M.-% AG > 50 M.-% AG.



**Abbildung 4-5. Kriechkurven aus dem Stempелеindringversuch der Mischgut-Varianten AC 32 T S unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und des Labormischverfahrens.**

**b) Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)**

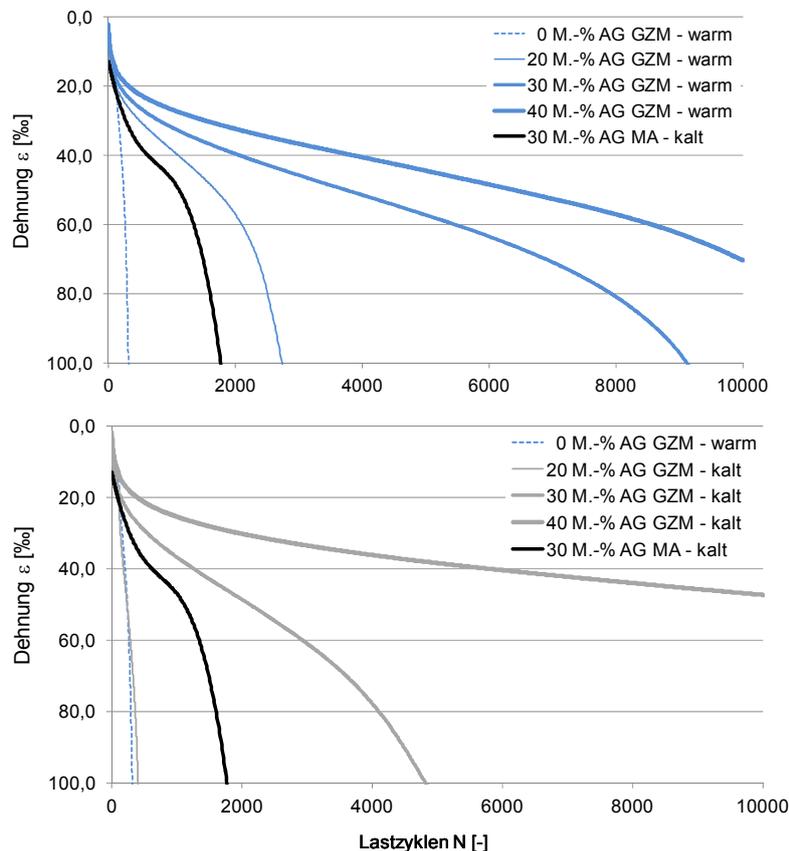
An der Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) wird u. a. der Einfluss des Zugabeverfahrens von Asphaltgranulat auf die Verformungseigenschaften näher untersucht.

Abbildung 4-6 zeigt die resultierenden Kriechkurven aus den Stempелеindringversuchen gemäß TP Asphalt, Teil 25 A 2 unter Variation des Zugabeanteils und des Zugabeverfahrens des Asphaltgranulats.

In blauer Farbe sind die Kriechkurven des mittels Gegenlauf-Zwangsmischer (GZM) im *Warmzugabeverfahren* hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten dargestellt (Abbildung 4-6, oben), in grauer Farbe jene im *Kaltzugabeverfahren* (Abbildung 4-6, unten). Desweiteren sind jeweils die Referenzmischgut-Variante oh-

ne Zugabe von Asphaltgranulat und die großtechnisch hergestellte Mischgut-Variante „Mischanlage“ (MA) mit 30 M.-% Asphaltgranulat im Kaltzugabeverfahren dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich mit Zunahme des Asphaltgranulates (20, 30, 40 M.-% AG) unabhängig vom Zugabeverfahren eine höhere Verformungsbeständigkeit im Vergleich zur Referenzmischgut-Variante (0 M.-% AG) einstellt.

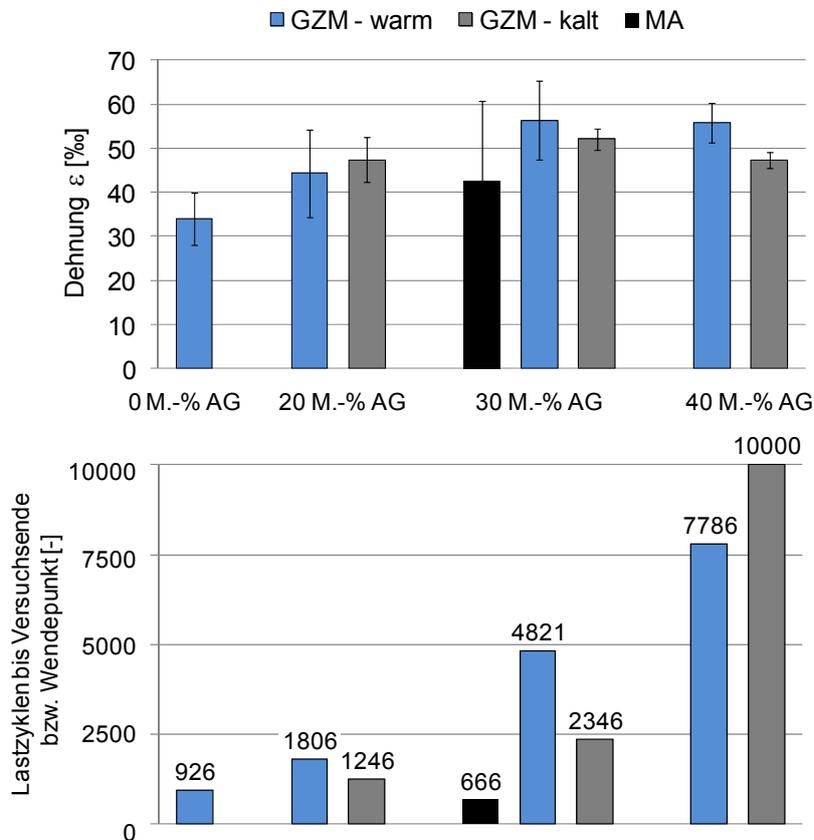


**Abbildung 4-6. Kriechkurven der Stempelerindringversuche unter Variation des Zugabeanteils und der Zugabeart des Asphaltgranulates unter Verwendung des Gegenlauf-Zwangsmischers (GZM) für die Mischgut-Varianten AC 32 T N.**

Alle Varianten weisen einen Wendepunkt im Dehnungsverlauf auf, mit Ausnahme der Asphalttragschicht-Variante 40 M.-% Asphaltgranulat im Kaltzugabeverfahren (vgl. Abbildung 4-7 unten).

Abbildung 4-7 gibt die Ergebnisse der Verformungsprüfung mit Spannweite und die korrespondierende Lastwechselzahl der Asphalttragschicht-Varianten bis zum Versuchsende wieder. Auffällig sind die vergleichsweise geringen Spannweiten der hergestellten Asphalttragschicht-Varianten unter Kaltzugabe. Dies liegt vermutlich an den entstehenden Wasserdämpfen bei Kaltzugabe, die den Mischwiderstand herabsetzen und somit den Mischprozess und die damit erreichte Homogenität des Mischguts begünstigen. Betrachtet man jedoch die erreichten Lastwechselzahlen bis zum Versuchsende, so kann (mit Ausnahme der Asphalttragschicht-Variante mit 40 M.-%

Asphaltgranulat) nicht von einem verbesserten Verformungsverhalten durch Zugabe von Asphaltgranulat ausgegangen werden.



**Abbildung 4-7. Ergebnisse der Stempелеindringversuche: Dehnung bei Versuchsende mit korrespondierender Spannweite der Mittelwertbildung (oben) und korrespondierende Lastwechselzahl bis Versuchsende bzw. Wendepunkt für die Mischgut-Varianten AC 32 T N.**

Da bei Überschneidung der Spannweiten je Untersuchungsvariante von einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse ausgegangen werden kann, ist eine Reihung der Zugabeart des Asphaltgranulates auf die Ergebnisse der Verformungsprüfung nicht ableitbar. Diese Erkenntnis deckt sich mit Untersuchungen von Grönniger et al (2009), der festhielt, dass die Zugabeart des Asphaltgranulats im Vergleich zur Zugabemenge einen untergeordneten Einfluss auf die ausgewählte Performance-Eigenschaft des Asphalttes aufweist.

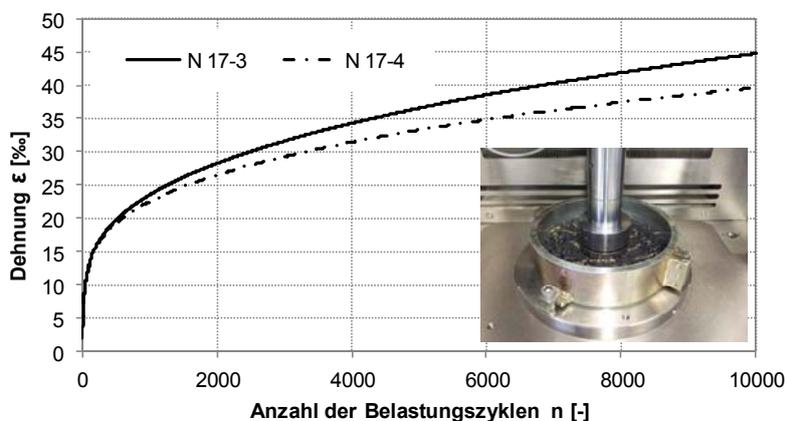
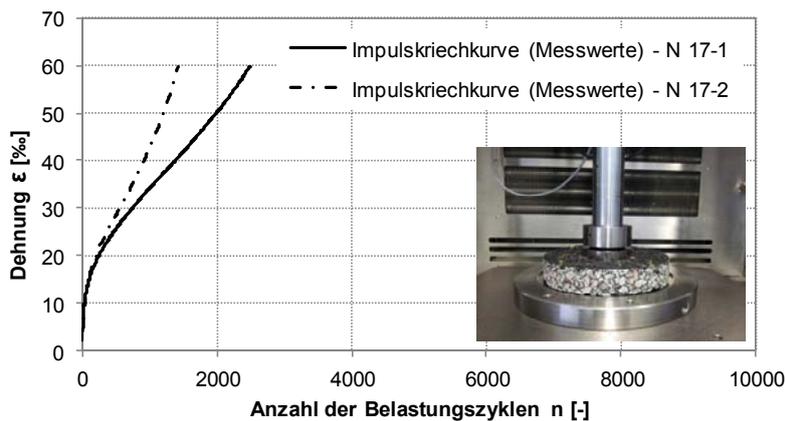
Tabelle 4-6 gibt die Ergebnisse der Verformungsprüfung für die Mischgut-Varianten AC 32 T N wieder.

Aufgrund der eingeschränkten Verformungsbeständigkeit der Mischgut-Varianten AC 32 T N unter Berücksichtigung der in den TP Asphalt, Teil 25 A 2 definierten Versuchsbedingungen, wurden zusätzlich Prüfungen unter Verwendung eines Stützringes aus Stahl durchgeführt, der an seiner zylindrischen Mantelfläche den Asphalt-Probekörper umschließt. Über eine Fixierung des Ringes mit der Unterlage wird ein seitliches Ausweichen des Probekörpers verhindert. Dadurch wird dem

Einspannungszustand der Asphalttschicht in der Straße besser Rechnung getragen (vgl. Abbildung 4-8, unten).

**Tabelle 4-6: Ergebnisse der dynamischen Stempelindringversuche der Mischgut-Varianten AC 32 T N**

	Anteil Asphaltgranulat [M.-%]	Mischer	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Dehnung [‰]	akkumulierte plastische Verformung [mm]	Dehnungsrate [‰ · 10 <sup>-4</sup> /n]
Warmzugabe	0	GZM	926	33,94	2,73	225,26
	20	GZM	1806	45,32	3,67	154,48
	30	GZM	4821	57,81	4,65	64,35
	40	GZM	7786	56,43	4,61	42,60
Kaltzugabe	20	GZM	1246	47,95	3,85	202,36
		GZM	2346	53,73	4,36	138,97
	30	MA	666	41,66	3,40	309,21
		In situ	-	-	-	-
	40	GZM	<b>10000</b>	<b>48,80</b>	<b>4,00</b>	<b>21,63</b>



**Abbildung 4-8. Kriechkurven aus dem Stempelindringversuch mit und ohne Stützring für die Asphalttragschicht-Variante AC 32 T N mit 0 M.-% Asphaltgranulat (Wistuba und Isailovic, 2014).**

Die Ergebnisse der vergleichenden Verformungsprüfungen mit und ohne Verwendung eines Stützringes beim Stempeleindringversuch sind in Tabelle 4-7 angegeben.

**Tabelle 4-7: Ergebnisse der Stempeleindringversuche mit und ohne Stützring für die Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T N mit 0 M.-% Asphaltgranulat**

Stützring	Anzahl der Belastungszyklen [-]	akkumulierte plastische Dehnung [‰]	akkumulierte plastische Verformung [mm]	Dehnungsrate [‰ · 10 <sup>-4</sup> /n]
nein	926	33,94	2,73	225,26
ja	10.000	42,19	3,42	16,73

Unter Verwendung des Stützringes ist im Vergleich zu der Durchführung des Stempeleindringversuchs ohne Stützring eine Interpretation der Versuchsergebnisse möglich. So könnte in nachfolgenden Untersuchungen der Einfluss des Zugabeverfahrens von Asphaltgranulat auf die Verformungseigenschaften validiert werden.

#### 4.1.2.2 Kälteverhalten

Zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse zum Kälteverhalten werden als Merkmalsgrößen

- die Bruchtemperatur beim Abkühlversuch inklusive der Bruchspannung,
- die maximale Zugfestigkeit,
- daraus resultierend die Zugfestigkeitsreserve

ausgewertet. Um vorteilhafte Kälteeigenschaften zu erreichen, sollten diese Merkmalsgrößen folgende Eigenschaften aufweisen:

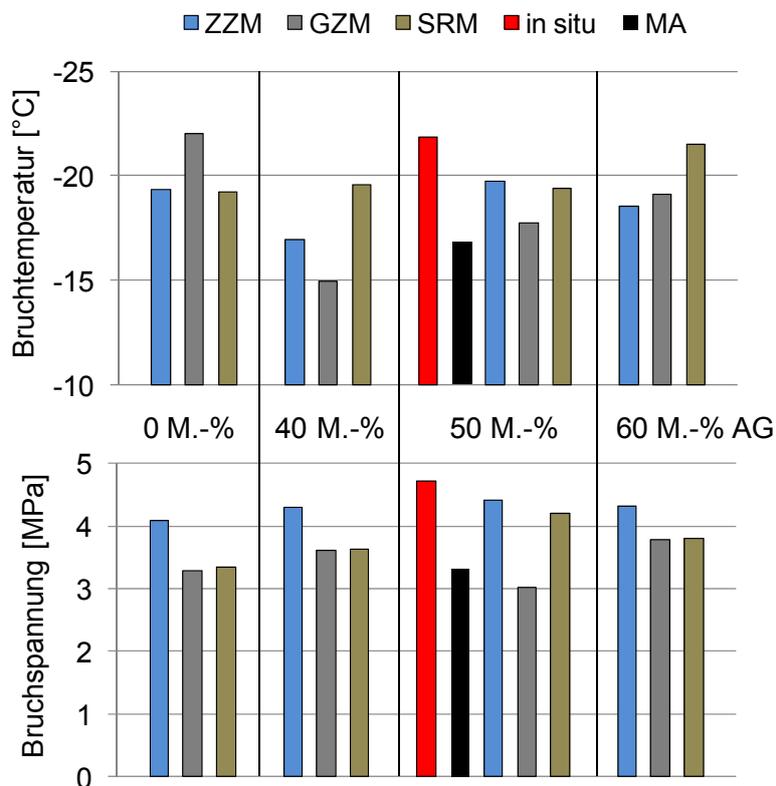
- Bei den Abkühlversuchen sollte die Bruchtemperatur möglichst tief liegen und eine möglichst hohe Bruchspannung erzielt werden.
- Bei der maximalen Zugfestigkeitsreserve sollte ein möglichst hoher Wert und eine möglichst tiefe dazugehörige Temperatur erreicht werden.

#### a) Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

In Tabelle 4-8 sind die aus dem Abkühlversuch ermittelten Bruchtemperaturen mit den korrespondierenden Bruchspannungen der unterschiedlich hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten AC 32 T S zusammengestellt. Fett gedruckt sind die erreichten Maximalwerte, die von der Asphalttragschicht-Variante „in situ“ erzielt werden. Abbildung 4-9 gibt die Ergebnisse graphisch wieder.

**Tabelle 4-8: Bruchtemperatur [°C] mit korrespondierender Bruchspannung [MPa] aus dem Abkühlversuch der hergestellten sowie der „in situ“ gewonnenen Mischgut-Varianten AC 32 T S**

	In situ	MA	ZZM	GZM	SRM
<b>Anteil AG [M.-%]</b>	<b>T<sub>Bruch</sub> / σ<sub>Bruch</sub></b>				
0	-	-	-19,4 / 4,09	-22,0 / 3,29	-19,3 / 3,33
40	-	-	-16,9 / 4,29	-14,9 / 3,62	-19,6 / 3,63
50	<b>-21,9 / 4,72</b>	-16,8 / 3,32	-19,8 / 4,40	-17,8 / 3,03	-19,4 / 4,19
60	-	-	-18,6 / 4,32	-19,1 / 3,78	-21,5 / 3,80



**Abbildung 4-9. Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus dem Abkühlversuch der Mischgut-Varianten AC 32 T S in Abhängigkeit der Herstellungsmodalitäten.**

Bezüglich der Bruchtemperatur ergeben sich unter Variation des Zugabeanteils von Asphaltgranulat geringe Unterschiede für die Labormischertypen ZZM (blau) und SRM (oliv). Die maximalen Abweichungen in der Bruchtemperatur betragen 2,8 °C (ZZM) und 2,3 °C (SRM). Der Zugabeanteil von Asphaltgranulat wirkt sich somit nur geringfügig aus.

Beim Gegenlauf-Zwangsmischer GZM (grau) ergeben sich beim Vergleich der einzelnen Untervarianten maximale Unterschiede in der Bruchtemperatur von 7,1 °C. Mit Zunahme des Asphaltgranulatanteils von 40 M.-% auf 60 M.-% verringert sich die

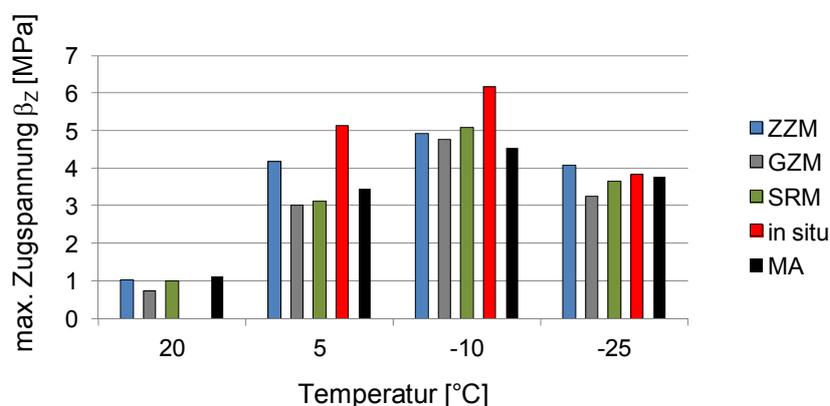
Bruchtemperatur. Die geringste Bruchtemperatur wird von der Referenz-Variante mit 0 M.-% Asphaltgranulat erzielt.

Bei Betrachtung der Bruchspannung sind keine eindeutigen Abhängigkeiten vom Zugabeanteil des Asphaltgranulates erkennbar. Beim direkten Vergleich der Labormischer erzielen die Materialien aus dem Zweiwellen-Zwangsmischer ZZM die höchsten Bruchspannungen. Die Asphalttragschicht-Varianten, die mit dem Gegenlauf-Zwangsmischer GZM und dem Schlag- und Rührmischer SRM hergestellt wurden, erzielen vergleichbare Bruchspannungen (mit Ausnahme der Asphalttragschicht-Variante mit 50 M.-% Asphaltgranulat).

In Abbildung 4-10 sind für die Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulat die Ergebnisse aus den Kältezugsprüfungen bei den Temperaturen +20 °C, +5 °C, -10 °C und -25 °C dargestellt.

Bezüglich der Zugspannung  $\beta_z$  ergeben sich je Prüftemperatur vergleichbare Größenordnungen unabhängig vom Labormischverfahren bzw. von den Herstellungsmodalitäten. Auffällig sind die hohen Zugspannungen der Asphalttragschicht-Variante „in situ“ und der mittels ZZM hergestellten Variante bei +5 °C und -25 °C.

Für die Asphalttragschicht-Variante „in situ“ konnte keine Dreifachbelegung der Kältezugsversuche aufgrund des knappen Probenmaterials realisiert werden. So erfolgte bei +5 °C und -25 °C eine Einfachbestimmung, bei -10 °C eine Zweifachbestimmung.



**Abbildung 4-10. Ergebnisse der Kältezugsprüfungen an den Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat (Mittelwerte).**

Die Ergebnisse der Kältezugsversuche für die AC 32 T S Varianten sind in Tabelle 4-9 zusammengestellt. Je Zugabeanteil an Asphaltgranulat ist die Asphalttragschicht-Variante mit den höchsten Zugspannungen fett gedruckt.

Aus den Ergebnissen der Abkühl- und der Kältezugsprüfung wird die Zugfestigkeitsreserve je Asphalttragschichtmischgut-Variante ermittelt (vgl. Tabelle 4-10). Die Favorisierung eines Labormischverfahrens hinsichtlich der Auswirkung auf das Kälteverhalten der hergestellten Asphalttragschicht-Varianten ergibt sich daraus nicht.

**Tabelle 4-9: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.**

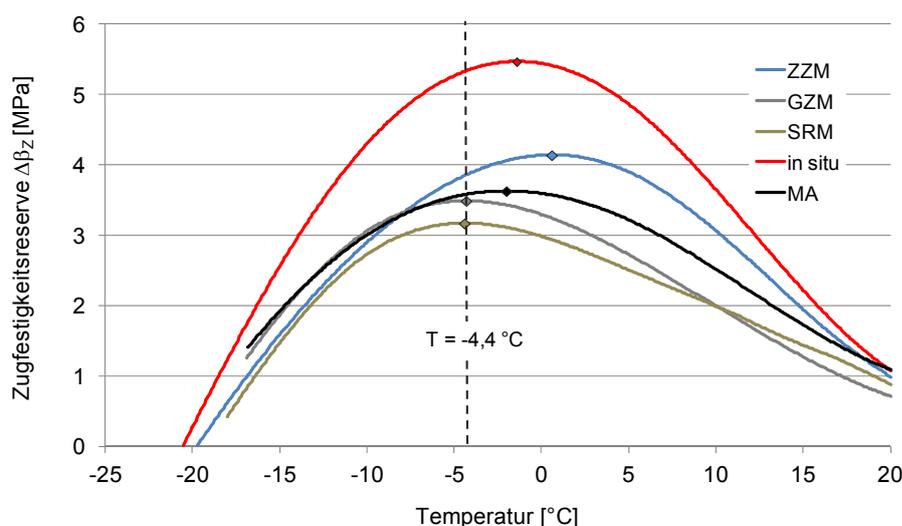
	0 M.-% AG			40 M.-% AG			50 M.-% AG					60 M.-% AG		
	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM	in situ	MA	ZZM	GZM	SRM	ZZM	GZM	SRM
$\beta_Z(+20^\circ\text{C})$	1,61	1,58	1,38	1,29	1,05	1,37	-	1,11	1,01	0,72	1,01	1,36	1,05	1,08
$\beta_Z(+5^\circ\text{C})$	4,35	3,60	3,14	3,62	3,51	3,37	5,13	3,45	4,17	3,01	3,12	3,89	3,67	3,93
$\beta_Z(-10^\circ\text{C})$	4,74	4,16	4,45	4,99	4,86	5,04	6,17	4,53	4,93	4,77	5,07	5,13	4,46	4,77
$\beta_Z(-25^\circ\text{C})$	4,04	3,49	3,59	4,31	3,77	3,51	3,83	3,77	4,07	3,26	3,64	4,13	3,74	3,84

**Tabelle 4-10: Maximale Zugfestigkeitsreserve mit korrespondierender Temperatur für die Mischgut-Varianten AC 32 T S**

	In situ	MA	ZZM	GZM	SRM
Anteil AG [M.-%]	$\sigma_{\text{Bruch}} / T_{\text{Bruch}}$				
0	-	-	4,22 / +1,4	3,64 / -0,2	3,50 / -3,9
40	-	-	3,53 / -1,3	3,38 / -1,2	3,79 / -4,1
50	5,47 / -1,4*)	3,63 / -2,0	4,14 / +0,6	3,49 / -4,3	3,17 / -4,4
60	-	-	3,89 / -0,9	3,38 / 1,2	4,03 / -0,5

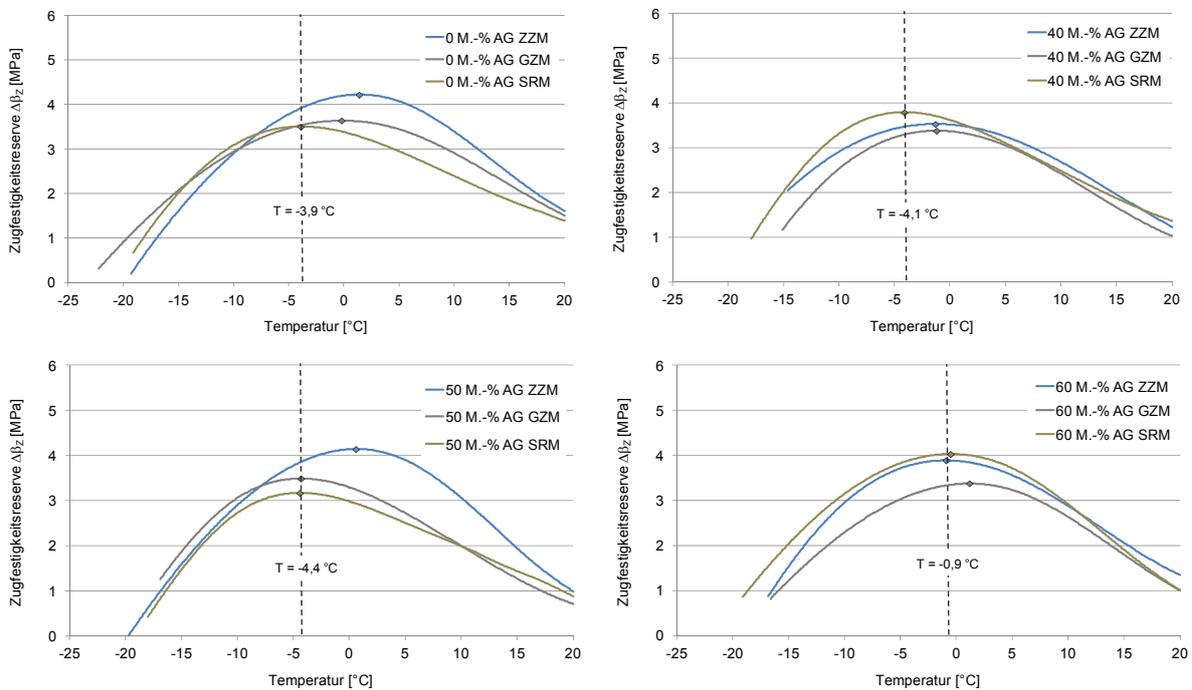
\*) für die Auswertung der Zugfestigkeitsreserve wurde die Zugfestigkeit der Variante MA bei +20 °C angenommen.

Den jeweiligen Verlauf der Zugfestigkeitsreserve über die Temperatur für alle Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulat zeigt Abbildung 4-11. Die „in situ“ verdichtete Variante (rot) weist im Vergleich zu den anderen Varianten die höchste Zugfestigkeitsreserve auf.



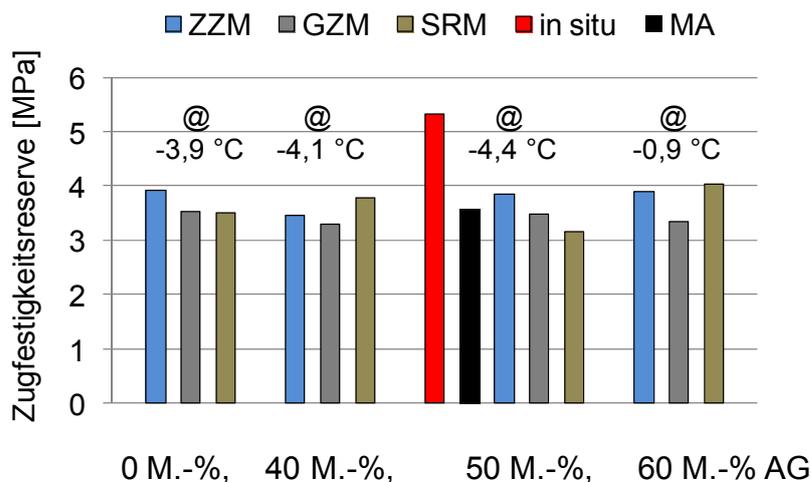
**Abbildung 4-11. Verlauf der Zugfestigkeitsreserven für die Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat (gestrichelte Linie bei -4,4 °C für Variante SRM).**

In Abbildung 4-12 sind die Verläufe der Zugfestigkeitsreserven unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und der eingesetzten Labormischverfahren dargestellt.



**Abbildung 4-12. Verlauf der Zugfestigkeitsreserven unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und der eingesetzten Labormischverfahren für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.**

Je Zugabeanteil an Asphaltgranulat werden zu den in Abbildung 4-12 dargestellten „Bezugstemperaturen“ die Zugfestigkeitsreserven ermittelt. Daraus ergibt sich in Abbildung 4-13 veranschaulichte Reihung.

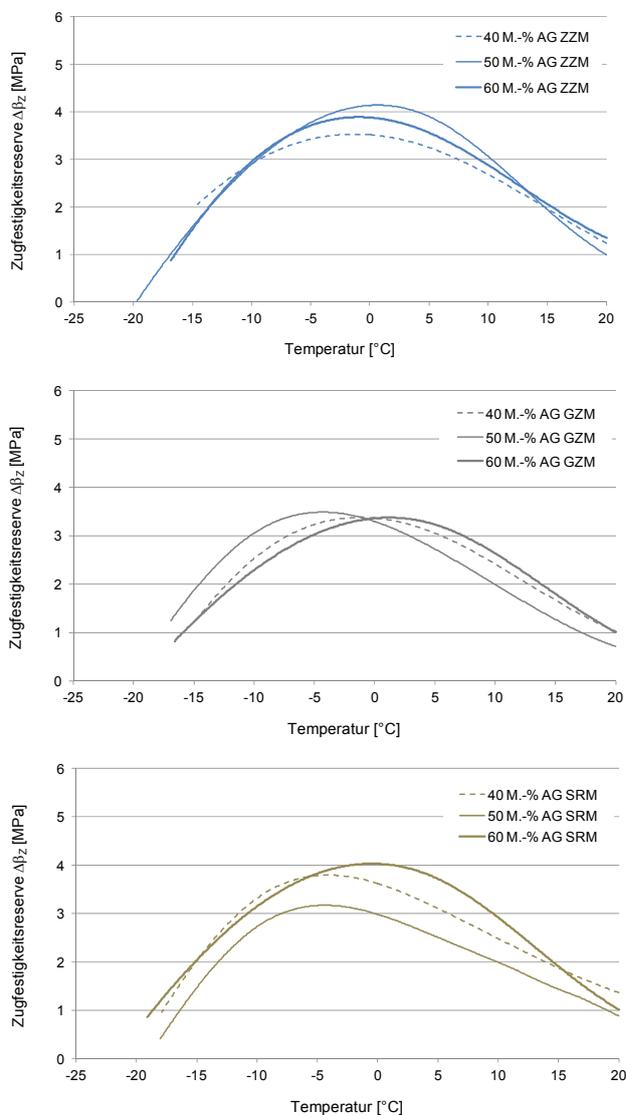


**Abbildung 4-13. Zugfestigkeitsreserve unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und der eingesetzten Labormischverfahren unter Verwendung der jeweils ermittelten Bezugstemperatur für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.**

Tendenziell weisen jene Asphalttragschicht-Varianten, die mittels ZZM hergestellt wurden, bessere Kälteeigenschaften auf als jene mittels GZM hergestellten. Die SRM-Variante zeigt bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat tendenziell bessere Kälteeigenschaften im Vergleich zu den mit anderen Labormischern hergestellten Varianten.

Das großtechnisch hergestellte Asphalttragschicht-Mischgut MA zeigt vergleichbare Ergebnisse zu den mit den Labormischverfahren ZZM und GZM hergestellten Varianten. Die „in situ“ verdichtete Asphalttragschicht-Variante weist die höchste Zugfestigkeitsreserve auf.

Bei den Mischgut-Varianten AC 32 T S wird keine eindeutige Abhängigkeit für das Kälteverhalten und den Zugabeanteil an Asphaltgranulat festgestellt (vgl. Abbildung 4-14).



**Abbildung 4-14. Verlauf der Zugfestigkeitsreserven unter Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates je Labormischverfahren für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.**

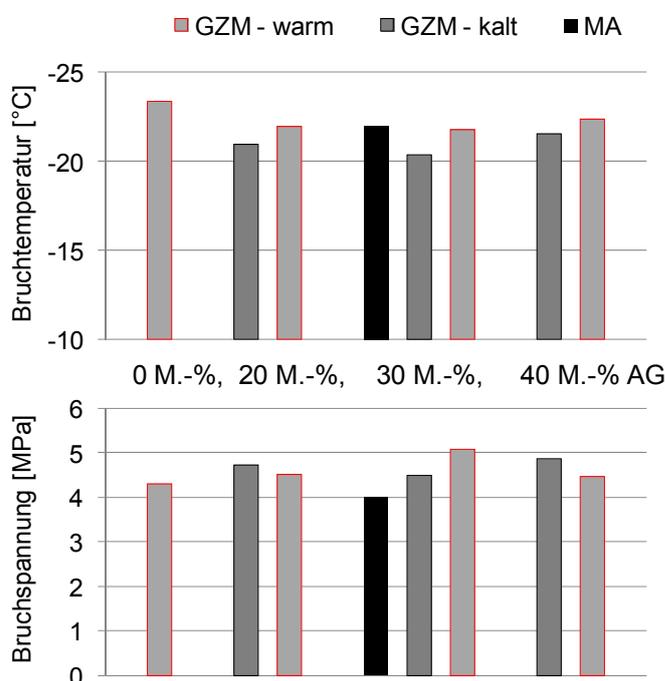
b) Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)

In Tabelle 4-11 sind die jeweiligen Bruchtemperaturen und die Bruchspannungen der Abkühlversuche für die Mischgut-Varianten AC 32 T N zusammengestellt. Abbildung 4-15 gibt die Ergebnisse graphisch wieder.

**Tabelle 4-11: Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus dem Abkühlversuch für die Mischgut-Varianten AC 32 T N**

	MA	GZM - Kaltzugabe	GZM - Warmzugabe
Anteil AG [M.-%]	$T_{\text{Bruch}} / \sigma_{\text{Bruch}}$		
0	-	-	-23,3 / 4,12
20	-	-20,93 / 4,72	-21,95 / 4,50
30	-22,0 / 4,02	-20,37 / 4,49	-21,77 / 5,07
40	-	-21,55 / 4,88	-22,4 / 4,48

Hinsichtlich der Bruchtemperaturen ergeben sich unter Variation der Zugabeanteile und des Zugabeverfahrens (Warm- und Kaltzugabe) von Asphaltgranulat maximale Unterschiede von 2,93 °C. Die tiefste Bruchtemperatur wird für die Referenz-Variante mit 0 M.-% Asphaltgranulat festgestellt.



**Abbildung 4-15. Bruchtemperaturen mit korrespondierenden Bruchspannungen aus dem Abkühlversuch für die Mischgut-Varianten AC 32 T N.**

Bei Betrachtung der Bruchspannungen sind keine eindeutigen Abhängigkeiten des Zugabeanteils und des Zugabeverfahrens des Asphaltgranulates ableitbar. Beim di-

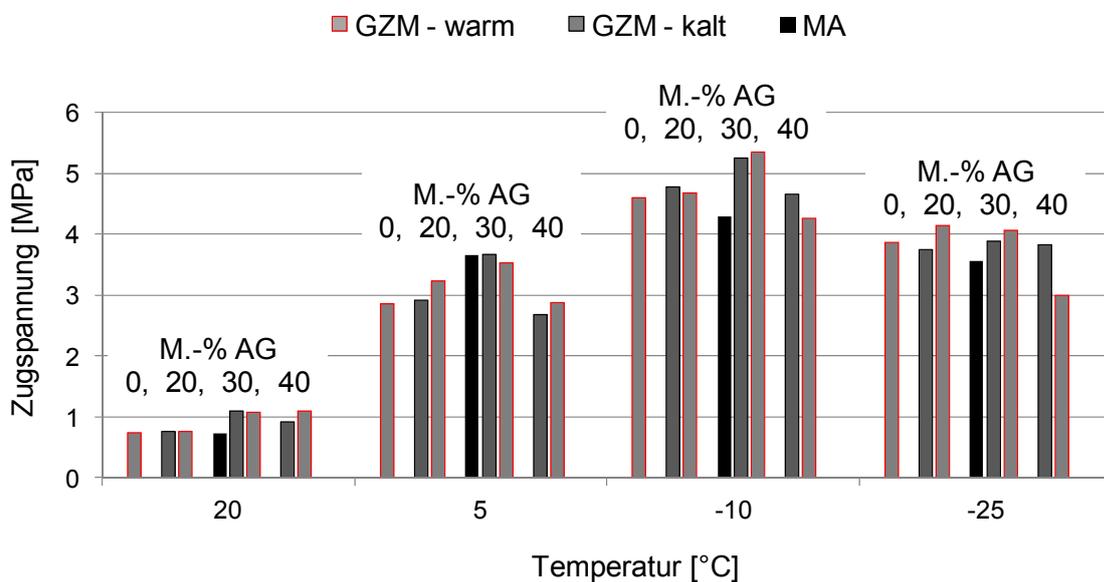
rekten Vergleich des Zugabeverfahrens untereinander erzielt die „Warmzugabe“ die höchste ermittelte Bruchspannung (30 M.-% Asphaltgranulat).

Die Asphalttragschicht-Varianten, die mittels GZM und Kaltzugabe hergestellt wurden, erzielen vergleichbare Bruchspannungen. Die mittels Warmzugabeverfahren hergestellten Asphalttragschicht-Varianten zeigen ebenfalls vergleichbare Bruchspannungen untereinander mit Ausnahme der Variation mit 30 M.-% Asphaltgranulatzugabe.

In Tabelle 4-12 sind die Ergebnisse der Kältezugsversuche für die Mischgut-Varianten AC 32 T N zusammengestellt. Abbildung 4-16 gibt die Ergebnisse graphisch wieder.

**Tabelle 4-12: Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T N**

	0 M.-% AG		20 M.-% AG		30 M.-% AG			40 M.-% AG	
	warm		warm	kalt	MA	warm	kalt	warm	kalt
$\beta_Z(+20^\circ\text{C})$	0,74		0,76	0,75	0,73	1,07	1,09	1,09	0,90
$\beta_Z(+5^\circ\text{C})$	2,86		3,22	2,91	3,65	3,53	3,66	2,87	2,68
$\beta_Z(-10^\circ\text{C})$	4,60		4,67	4,77	4,28	5,34	5,24	4,25	4,66
$\beta_Z(-25^\circ\text{C})$	3,86		4,14	3,74	3,55	4,07	3,88	2,98	3,82



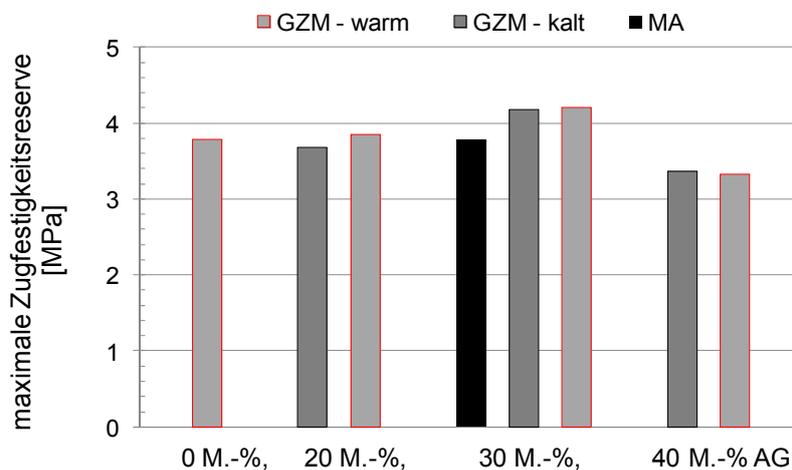
**Abbildung 4-16. Ergebnisse der Kältezugsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T N.**

Aus den Ergebnissen der Abkühl- und der Kältezugsprüfung wird die Zugfestigkeitsreserve je Asphalttragschicht-Variante ermittelt (vgl. Tabelle 4-13).

**Tabelle 4-13: Maximale Zugfestigkeitsreserven mit korrespondierenden Temperaturen für die Mischgut-Varianten AC 32 T N**

	MA	GZM - Kaltzugabe	GZM - Warmzugabe
Anteil AG [M.-%]	$\Delta\beta_z(T) / T(\Delta\beta_{z,t,max})$		
0	-	-	3,78 / -5,9
20	-	3,69 / -4,8	3,85 / -3,8
30	3,78 / 0,0	4,18 / -3,3	4,20 / -4,0
40	-	3,37 / -4,9	3,33 / -4,0

In Abbildung 4-17 sind die maximalen Zugfestigkeitsreserven aller im Labor hergestellten Mischgut-Varianten AC 32 T N sowie der großtechnisch hergestellte Variante MA dargestellt.



**Abbildung 4-17. Maximale Zugfestigkeitsreserven unter Variation des Zugabeanteils und des Zugabeverfahrens von Asphaltgranulat für die Mischgut-Varianten AC 32 T N.**

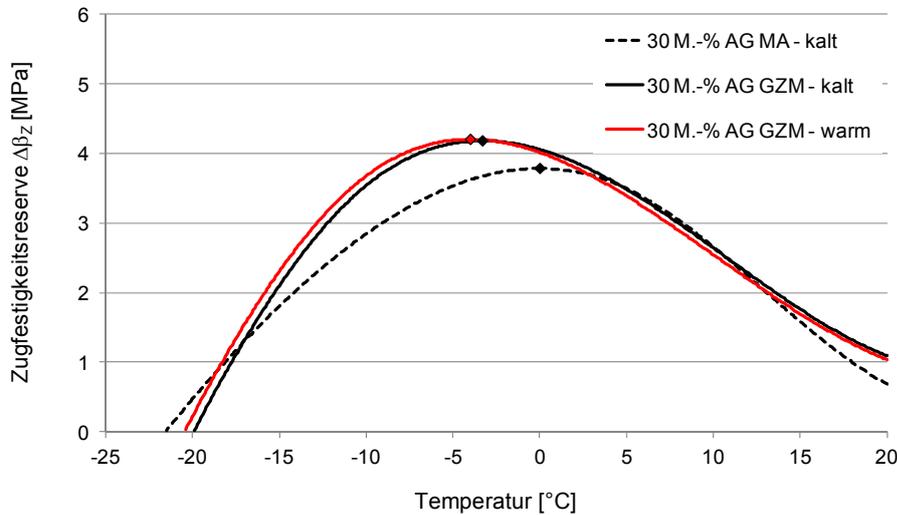
Das Zugabeverfahren, Warm- bzw. Kaltzugabe bei gleichem Zugabeanteil an Asphaltgranulat bewirkt geringfügige Änderungen hinsichtlich der Zugfestigkeitsreserven und deren korrespondierender Temperatur.

Der Zugabeanteil an Asphaltgranulat bewirkt eine Änderung der maximalen Zugfestigkeitsreserve. Die Variante mit 0 M.-% Asphaltgranulat zeigt vergleichbare maximale Zugfestigkeitsreserven zu den Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat und der großtechnisch hergestellten Variante MA.

Die Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat weisen die geringsten Zugfestigkeitsreserven auf, jene im Labor mittels GZM hergestellten Varianten mit 30 M.-% Asphaltgranulat die höchsten.

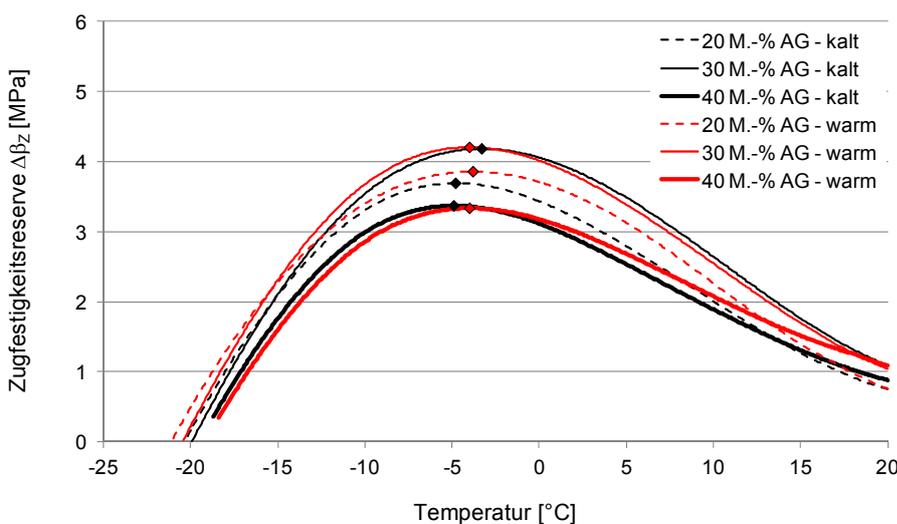
Der jeweilige Verlauf der Zugfestigkeitsreserve über die Temperatur für die hergestellten Asphalttragschicht-Varianten mit 30 M.-% Asphaltgranulat ist in Abbildung

4-18 dargestellt. In roter Farbe ist der Verlauf der Zugfestigkeitsreserve für das Zugabeverfahren „warm“, in schwarz jene für die Kaltzugabe eingetragen. Die großtechnisch hergestellte Variante MA ist mittels gestrichelter Linie dargestellt.



**Abbildung 4-18. Verlauf der Zugfestigkeitsreserven über die Temperatur für die Mischgut-Varianten AC 32 T N mit 30 M.-% Asphaltgranulat in Abhängigkeit vom Zugabeverfahren.**

Auffällig ist der annähernd deckungsgleiche Verlauf der Zugfestigkeitsreserven der im Labor hergestellten Asphalttragschicht-Varianten (GZM). Die geringe Differenz von 0,02 MPa in der maximalen Zugfestigkeitsreserve und der geringe Temperaturunterschied von 0,7 °C deuten auf vergleichbare Kälteeigenschaften hin. Die großtechnisch hergestellte Asphalttragschicht-Variante MA zeigt ein abweichendes Verhalten, gekennzeichnet durch eine geringere maximale Zugfestigkeitsreserve in Höhe von 3,78 MPa bei einer Temperatur von 0,0 °C.



**Abbildung 4-19. Verlauf der Zugfestigkeitsreserven über die Temperatur für die mittels GZM hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten AC 32 T N.**

In Abbildung 4-19 sind die Verläufe der Zugfestigkeitsreserven über die Temperatur für alle mittels des Labormischverfahrens GZM hergestellten Asphalttragschichtmischgut-Varianten dargestellt. Auffällig ist der annähernd deckungsgleiche Verlauf der Zugfestigkeitsreserven der Asphalttragschicht-Varianten mit 30 und 40 M.-% Asphaltgranulatzugabe. Bei den Asphalttragschicht-Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulatzugabe kommt es zu einem geringfügigen Versatz der Verläufe der Zugfestigkeitsreserve.

#### 4.1.2.3 Ermüdungsverhalten im Zug-Schwellversuch

Zur Ansprache der Ermüdungseigenschaften wurden Zug-Schwellversuche an prismatischen Asphalt-Probekörpern durchgeführt.

##### a) Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

Basierend auf den Ergebnissen aus Abkühl- und Kältezugsversuchen (hier bei Zugabe eines Asphaltgranulatanteils von 50 M.-%; Abbildung 4-10), können Eingangsgrößen für den Zug-Schwellversuch gemäß DIN EN 12697-46 abgeleitet werden. Hierfür wird je Asphaltvariante der entsprechende Wert der kryogenen Zugspannung ermittelt, der zu der im Zug-Schwellversuch festgelegten Prüftemperatur korrespondiert. Die kryogene Zugspannung wird als Unterspannung  $\sigma_u$  für den Zug-Schwellversuch angesetzt. Gemäß DIN EN 12697-46 wird die Oberspannung  $\sigma_o$  aus  $\sigma_u$  und einer mechanogenen Spannung  $\Delta\sigma$  von 1,6 MPa gebildet.

Wie Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 zeigen, weichen die Kennwerte Bruchtemperatur, Bruchspannung sowie Zugfestigkeiten teilweise stark voneinander ab. Um die Ermüdungsergebnisse miteinander vergleichen zu können, wird eine einheitliche Unterspannung je Prüftemperatur vorgegeben. Die Beanspruchung der Probekörper ist somit einheitlich.

Die Prüftemperaturen sind + 5, 0 und -5 °C. Die ermittelten kryogenen Zugspannungen je Labormischverfahren sind in Tabelle 4-14 dargestellt. Aus diesen wird jeweils eine Unterspannung je Prüftemperatur festgelegt.

**Tabelle 4-14: Kryogene Zugspannungen bei den Temperaturen +5, 0, -5 °C bei Variation des Labormischers bei 50 M.-% Asphaltgranulatzugabe für die Mischgut-Variante AC 32 T S**

	+ 5 °C	0 °C	- 5 °C
MA	0,2584	0,4356	0,8731
ZZM	0,2349	0,5868	1,2216
GZM	0,2835	0,5497	1,0787
SRM	<i>0,3456</i>	<i>0,6417</i>	<i>1,2566</i>

Als einheitliche Unterspannung wird jeweils das Maximum (hier kursiv) als Eingangsgröße für den Zug-Schwellversuch gewählt - einheitlich für alle Asphalttragschichtvarianten mit einem Zugabeanteil des Asphaltgranulats von 50 M.-% (vgl. Tabelle 4-15).

**Tabelle 4-15: Gewählte Unter- und Oberspannungen als Eingangsgröße in die Zug-Schwell-Prüfung für die Mischgut-Varianten AC 32 T S**

	+5 °C	0 °C	-5 °C
Unterspannung $\sigma_u$ [MPa]	0,3456	0,6417	1,2566
Oberspannung $\sigma_o$ [MPa]	1,9456	2,2417	2,8566

In Tabelle 4-16 sind die resultierenden Lastwechselzahlen aus dem Zug-Schwellversuch (für das Ermüdungskriterium  $N_{\text{makro}}$ ) für die Prüftemperaturen +5, 0 und -5 °C dargestellt.

**Tabelle 4-16: Mittelwerte der Lastwechselzahlen bei Ermüdungsversagen  $N_{\text{Makro}}$  unter Variation des Labormischverfahrens und der Prüftemperatur für die Mischgut-Varianten AC 32 T S**

Mischer	Lastwechselzahl $N_{\text{Makro}}$ @		
	+5 °C	0 °C	-5 °C
MA	16.956	126.137	11.504
ZZM	4.504	18.138	78.201
GZM	1.436	51.139	62.706
SRM	1.003	9.305	94.203

Die Prüfstreuung wird bei Analyse der Standardabweichungen deutlich, siehe Tabelle 4-17. Die Prüfstreuung entspricht nicht den Erwartungen, insbesondere nicht für den SRM, weil die Eingangsgrößen für den Zug-Schwellversuch von den Ergebnissen der Kälteprüfung des SRM abgeleitet wurden.

**Tabelle 4-17: Standardabweichungen von  $N_{\text{Makro}}$  (Absolutwert und in Prozent vom Mittelwert)**

	+5 °C		0 °C		-5 °C	
	Stabw	Stabw [%]	Stabw	Stabw [%]	Stabw	Stabw [%]
MA	10.250,93	60,45	169.803,90	134,62	6.078,29	52,84
ZZM	3.184,81	70,71	19.798,99	72,77	41.012,19	52,44
GZM	2.196,27	152,94	26.162,24	34,11	9.187,44	14,65
SRM	25.600,09	127,32	13.025,46	139,99	18.381,95	19,51

Für die weitere Vorgehensweise wird die Prüftemperatur auf + 20 °C erhöht und eine zweifache Variation der Oberspannung festgelegt (Tabelle 4-18).

**Tabelle 4-18: Festlegung von Unter- bzw. Oberspannung als Eingangsgröße in die Zug-Schwell-Prüfung bei 20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T S**

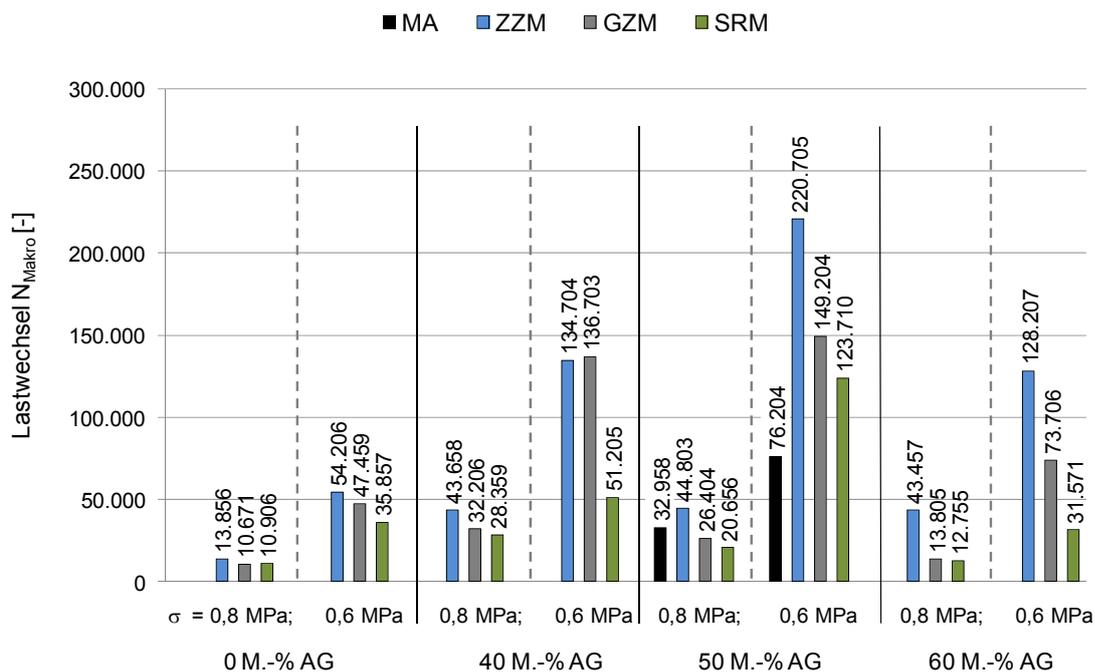
Mischer	Unterspannung $\sigma_u$ [MPa]	Oberspannung 1 $\sigma_o$ [MPa]	Oberspannung 2 $\sigma_o$ [MPa]
ZZM / GZM / SRM	0,035	0,6	0,8

Tabelle 4-19 zeigt die erzielten Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  mit den zugehörigen Standardabweichungen bei einer Prüftemperatur von 20 °C.

**Tabelle 4-19: Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  und Standardabweichungen bei +20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T S in der Zug-Schwellversuch bei Variation der Oberspannung  $\sigma_o$**

M.-% AG	$\sigma_o$	ZMZ			GZM			SRM		
		$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]	$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]	$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]
0 %	0,8	13.856	349,31	2,52	10.671	815,15	7,64	10.906	2.124,15	19,48
	0,6	54.206	9.905,15	18,27	47.459	12.374,37	26,07	35.856	2.752,77	7,68
40 %	0,8	43.658	7.846,06	17,97	32.205	9.758,78	30,30	28.359	6.716,10	23,68
	0,6	134.704	4.949,75	3,67	136.702	12.018,69	8,79	51.205	1.409,97	2,75
50 %	0,8	44.802	11.878,69	26,51	26.404	7.156,03	27,10	20.656	1.486,34	7,20
	0,6	220.704	31.814,86	14,42	149.204	59.401,21	39,81	123.709	23.335,23	18,86
60 %	0,8	43.457	6.721,76	15,47	13.805	1.835,65	13,30	12.754	5.301,18	41,56
	0,6	128.207	3.000,50	2,34	73.706	9.189,56	12,47	31.571	2.411,78	7,64

Es ist eine deutlich geringere Prüfstreuung im Vergleich zu jenen Ergebnissen im Tieftemperaturbereich festzustellen und es zeigt sich bei der Prüftemperatur von 20 °C eine deutliche Unterscheidung im mechanischen Verhalten in Abhängigkeit des Mischverfahrens. Die Prüftemperatur von + 20 °C wird daher für alle weiteren Zug-Schwellversuchen festgelegt. In Abbildung 4-20 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt.



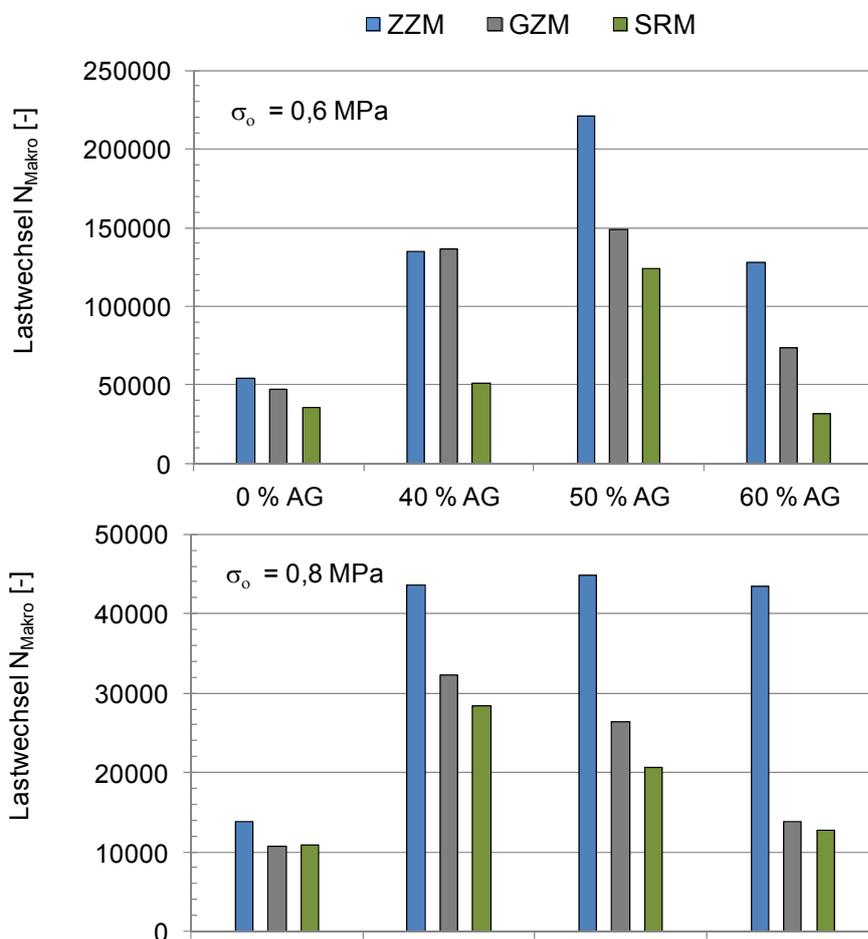
**Abbildung 4-20. Lastwechselzahlen unter Variation des Labormischverfahrens, der Oberspannung und der Asphaltgranulatzugabe von 0 M.-%, 40 M.-%, 50 M.-% und 60 M.-% bei einer Prüftemperatur von + 20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.**

Der Zugabeanteil des Asphaltgranulates beeinflusst die Ermüdungsbeständigkeit. Vorteilhaftere Ermüdungseigenschaften zeichnen sich bei einer Zugabe von 50 M.-%

Asphaltgranulat und einer gewählten Oberspannung  $\sigma_o$  von 0,6 MPa für alle Labormischverfahren ab (vgl. Abbildung 4-21, oben).

Bei einer gewählten Oberspannung  $\sigma_o$  von 0,8 MPa und einer Zugabemenge von 40 M.-% Asphaltgranulat werden die größten Lastwechselzahlen erreicht (vgl. Abbildung 4-21, unten). Auffällig ist der annähernd lineare Zusammenhang zwischen dem Zugabeanteil von Asphaltgranulat und der ermittelten Lastwechselzahl bei den Labormischverfahren GZM und SRM. Hier nimmt die Ermüdungsbeständigkeit mit einem zunehmenden Anteil an Asphaltgranulat von 40 auf 60 M.-% ab.

Für das Mischgut aus dem Labormischverfahren ZZM zeigen sich bei einer Oberspannung von  $\sigma_o = 0,8$  MPa unabhängig vom Zugabeanteil an Asphaltgranulat annähernd gleiche Lastwechselzahlen.



**Abbildung 4-21. Auswirkungen des Zugabeanteils an Asphaltgranulat auf die in der Zug-Schwellversuch ermittelten Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  bei Variation des Labormischverfahrens und bei einer Prüftemperatur von + 20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.**

b) Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)

Für die Mischgut-Varianten AC 32 T N wurde in Analogie zu Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) die Prüftemperatur auf + 20 °C bei einer zweifachen Variation der Oberspannung festgelegt. Aufgrund des eingesetzten „weichen“ Frischbindemittels der Sorte 70/100 wurden die Oberspannungen gemäß Tabelle 4-20 angepasst.

**Tabelle 4-20: Festlegung von Unter- und Oberspannung als Eingangsgröße in die Zug-Schwell-Prüfung bei 20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T N**

Zugabeverfahren	Unterspannung $\sigma_u$ [MPa]	Oberspannung $\sigma_o$ 1 [MPa]	Oberspannung $\sigma_o$ 2 [MPa]
warm / kalt	0,035	0,4	0,6

Tabelle 4-21 zeigt die resultierenden Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  und die Standardabweichungen bei einer Prüftemperatur von 20 °C. Abbildung 4-22 gibt die Ergebnisse graphisch wieder.

**Tabelle 4-21: Lastwechselzahlen und Standardabweichungen bei einer Prüftemperatur von +20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T N**

M.-% AG	$\sigma_o$	MA			GZM - kalt			GZM - warm		
		$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]	$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]	$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]
0 %	0,6	-	-	-	-	-	-	11.206	1.842,72	16,44
	0,4	-	-	-	-	-	-	43.654	12.096,48	27,71
20 %	0,6	-	-	-	6.504	348,44	5,36	8.105	1.441,94	17,79
	0,4	-	-	-	25.772	3.411,21	13,24	24.238	6.293,12	25,96
30 %	0,6	8.753	916,41	10,47	12.702	1.129,96	8,90	17.105	1.711,49	10,01
	0,4	35.353	73,54	0,21	63.703	3.532,00	5,54	42.557	5.163,29	12,13
40 %	0,6	-	-	-	7.404	2.405,58	32,49	26.506	1.698,47	6,41
	0,4	-	-	-	55.207	15.552,81	28,17	43.706	4.951,87	11,33

Für die Mischgut-Varianten unter Warmzugabe werden höhere Lastwechselzahlen bei einer Oberspannung von  $\sigma = 0,6$  MPa im Vergleich zur Kaltzugabe festgestellt. Bei einer Oberspannung von  $\sigma = 0,4$  MPa kehren sich die Verhältnisse um.

Im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante ohne Zugabe von Asphaltgranulat ergeben sich bei einem Zugabeanteil von 30 M.-% und bei einer Oberspannung von  $\sigma = 0,6$  MPa vergleichbare Lastwechselzahlen für die Warm- und Kaltzugabe.

Bei einer Oberspannung von  $\sigma = 0,4$  MPa werden annähernd gleiche Lastwechselzahlen bei Warmzugabe von 20 und 40 M.-% Asphaltgranulat festgestellt.

Ein höherer Anteil von Asphaltgranulat führt bei der Warmzugabe zu einer Erhöhung der Lastwechselzahl. Bei der Kaltzugabe werden für das Mischgut mit einem ein Zugabeanteil von 30 M.-% Asphaltgranulat die höchsten Lastwechselzahlen erzielt.

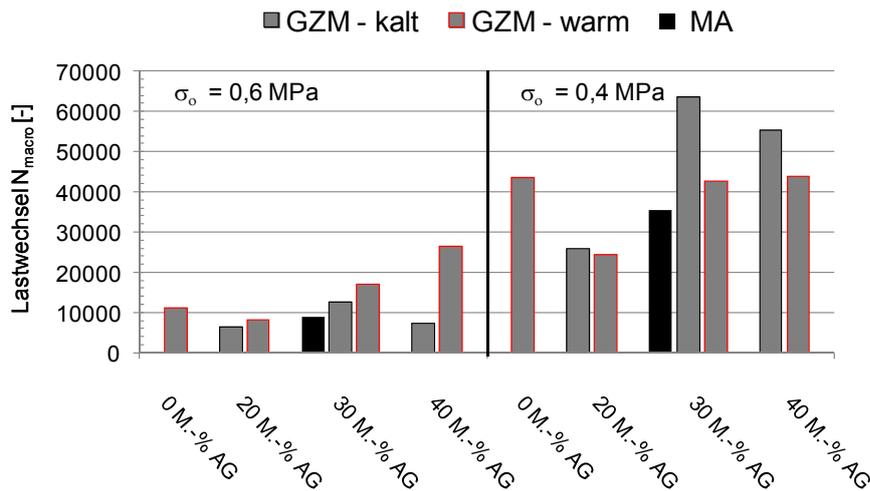


Abbildung 4-22. Lastwechselzahlen unter Variation des Zugabeverfahrens, der Oberspannung und der Asphaltgranulatzugabe von 0 M.-%, 20 M.-%, 30 M.-% und 40 M.-% bei einer Prüftemperatur von + 20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T N.

#### 4.1.2.4 Ermüdungs- und Steifigkeitsverhalten im Spaltzug-Schwellversuch

Für alle Asphalttragschicht-Varianten liegen Ergebnisse zu den Steifigkeitsmoduln und zum Ermüdungsverhalten aus Spaltzug-Schwellversuchen vor.

##### a) Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

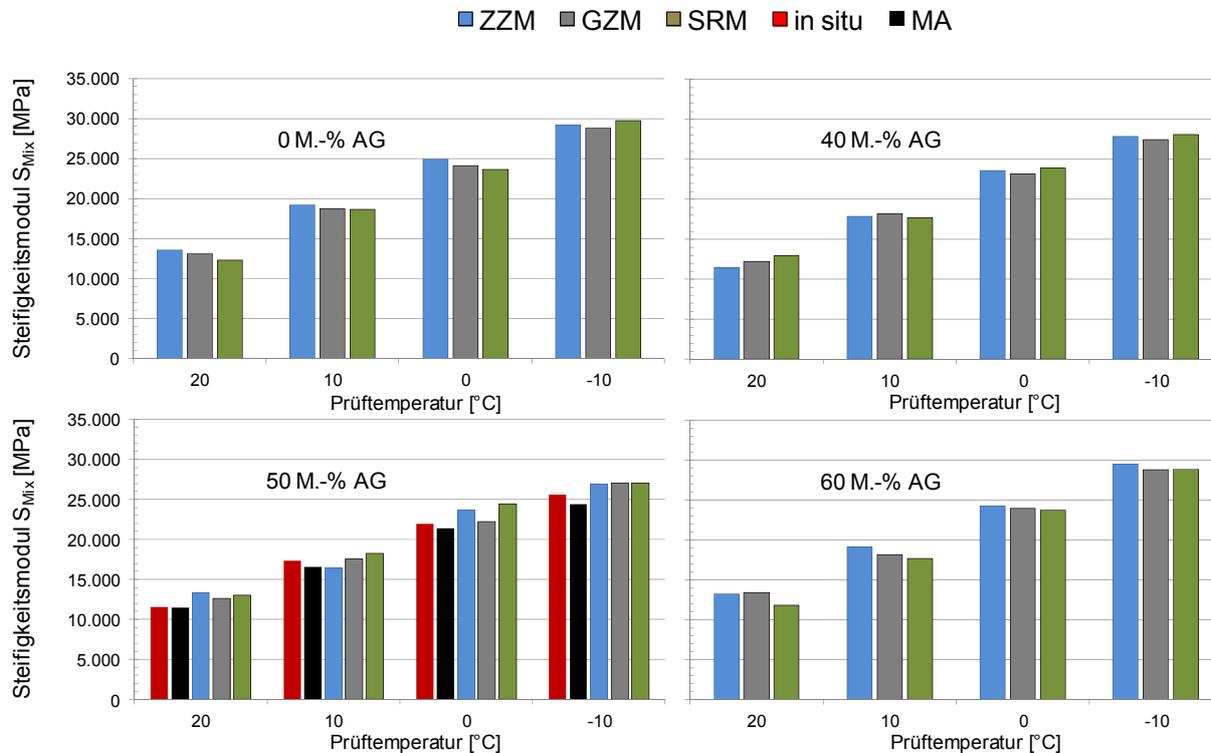
Die bei den Prüftemperaturen +20, +10, 0, und -10 °C und bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelten Steifigkeitsmoduln sind in Tabelle 4-22 angegeben. Abbildung 4-23 gibt die Ergebnisse graphisch wieder.

Tabelle 4-22: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz

Zugabeanteil AG [M.-%]	T [°C]	Steifigkeit [MPa]				
		MA	in situ	ZZM	GZM	SRM
0	20	-	-	13.552	13.079	12.285
	10	-	-	19.196	18.699	18.644
	0	-	-	24.887	24.150	23.658
	-10	-	-	29.220	28.804	29.718
40	20	-	-	11.446	12.270	12.964
	10	-	-	17.870	18.236	17.694
	0	-	-	23.583	23.193	23.876
	-10	-	-	27.866	27.475	28.099
50	20	11.506	11.567	13.356	12.650	12.987
	10	16.572	17.366	16.457	17.546	18.224
	0	21.427	21.939	23.658	22.198	24.415
	-10	24.430	25.612	26.907	27.053	27.083
60	20	-	-	13.217	13.379	11.794
	10	-	-	19.143	18.133	17.678
	0	-	-	24.282	23.925	23.690
	-10	-	-	29.480	28.776	28.874

Tendenziell werden für das Mischgut aus dem Labormischverfahren ZZM leicht erhöhte Steifigkeitsmoduln im Vergleich zu den mittels SRM und GZM hergestellten

Mischgut-Varianten festgestellt. Die großtechnisch hergestellte Asphalttragschicht-Variante MA weist bei den Prüftemperaturen 10, 0 und -10 °C geringere Steifigkeitsmoduln auf als die Mischgut-Variante „in situ“. Für diese werden zu den Mischgut-Varianten aus den Labormischverfahren vergleichbare E-Moduln erhalten.



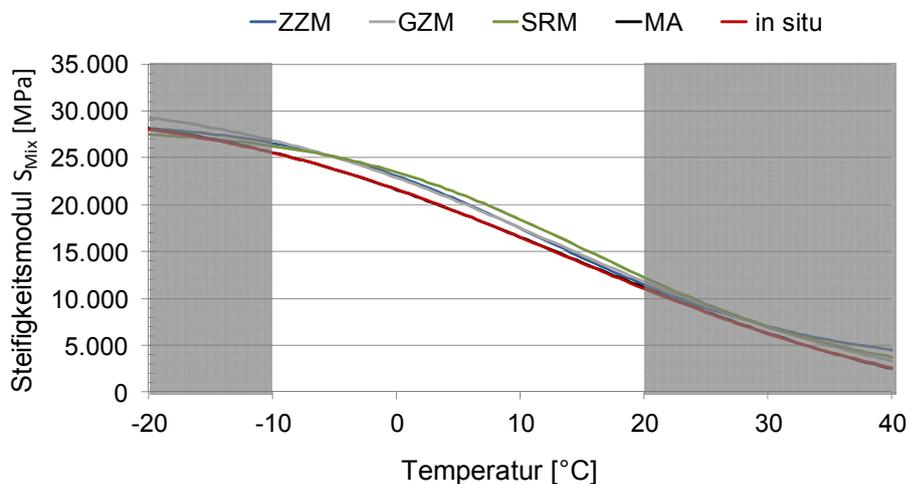
**Abbildung 4-23. Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Herz.**

Unter Verwendung von Gleichung 3-19 und unter Berücksichtigung aller Prüffrequenzen zur Ermittlung des Steifigkeitsmoduls (gemäß AL Sp-Asphalt 09 sind mindestens 3 verschiedene Belastungsfrequenzen zwischen 0,1 und 10 Herz zu wählen; hier sind gewählt: 0,1, 1, 5 und 10 Herz) werden die in Tabelle 4-23 angegebenen Regressionsparameter der Sigmoidfunktion je Asphalttragschicht-Variante erhalten.

**Tabelle 4-23: Regressionsparameter  $y_0$ ,  $w$ ,  $x_0$ ,  $z$  der Sigmoidfunktionen der Mischgut-Varianten AC 32 T S**

Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]	MA	in situ	ZZM	GZM	SRM
0	$y_0$	-	-	-6.046,65	-1.390,04	-5.067,68
	$w$	-	-	41.773,72	37.045,97	41.174,45
	$x_0$	-	-	0,12	0,76	0,39
	$z$	-	-	2,15	2,09	2,21
40	$y_0$	-	-	-837,95	-3.206,92	-3.180,97
	$w$	-	-	31.893,69	35.430,40	34.950,62
	$x_0$	-	-	0,40	0,18	0,14
	$z$	-	-	1,66	2,05	1,88
50	$y_0$	-5.849,25	-4.384,11	1.860,79	-2.999,46	129,33
	$w$	36.788,80	34.713,45	27.142,15	34.402,71	27.965,49
	$x_0$	0,03	0,15	0,56	0,24	0,08
	$z$	2,20	2,05	1,45	1,95	1,44
60	$y_0$	-	-	-8.323,65	-3.360,69	-5.131,92
	$w$	-	-	45.595,66	38.693,24	41.207,91
	$x_0$	-	-	0,03	0,44	0,46
	$z$	-	-	2,47	2,16	2,21

Der Steifigkeitsverlauf über die Temperatur am Beispiel der Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulat ist in Abbildung 4-24 dargestellt. Extrapolierte Bereiche sind in grauer Farbe gekennzeichnet. Es zeigen sich annähernd deckungsgleiche Verläufe für die Steifigkeitsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten „in situ“ und MA sowie für die mittels ZZM und GZM hergestellten Varianten.

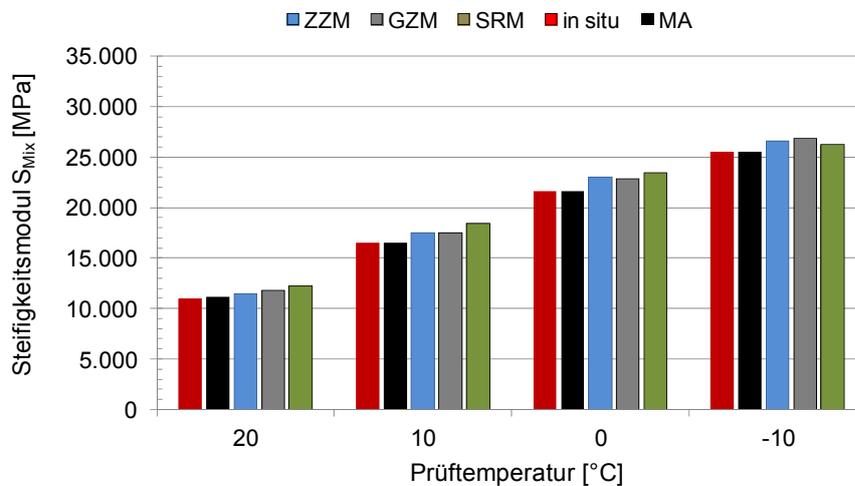


**Abbildung 4-24. Steifigkeitsverlauf über die Temperatur am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat.**

Abbildung 4-25 zeigt die Steifigkeitsmoduln für die Temperaturen 20, 10, 0 und -10 °C der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat unter Verwendung der Sigmoidfunktion.

Für die mittels unterschiedlicher Labormischverfahren hergestellten Asphalttragschicht-Varianten (ZZM, GZM und SRM) werden tendenziell höhere Steifigkeiten im

Vergleich zu den Varianten „in situ“ und MA festgestellt. Diese weisen vergleichbare Steifigkeitsverläufe über die Temperatur auf.



**Abbildung 4-25. Steifigkeitsmodul für die Temperaturen 20, 10, 0 und -10 °C der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat.**

Die Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten der Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Prüftemperatur +20 °C und für eine Prüffrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 4-24 wiedergegeben. Die Ermüdungsfunktionen aller im Labor hergestellten Asphalttragschicht-Varianten erreichen Bestimmtheitsmaße von über 80 % (Mindestanforderung für Asphalttragschichten gem. AL Sp-Asphalt 09).

**Tabelle 4-24: Regressionsparameter C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> und Bestimmtheitsmaße R<sup>2</sup> der Ermüdungsfunktionen aus dem Spaltzug-Schwellversuch je Mischgut-Variante AC 32 T S**

Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]	MA	in situ	ZYM	GYM	SRM
0	C <sub>1</sub>	-	-	0,8082	0,6670	1,2532
	C <sub>2</sub>	-	-	-3,901	-4,0538	-3,6188
	R <sup>2</sup>	-	-	0,921	0,959	0,900
40	C <sub>1</sub>	-	-	1,5170	1,8506	1,8964
	C <sub>2</sub>	-	-	-3,6579	-3,5514	-3,4530
	R <sup>2</sup>	-	-	0,953	0,908	0,923
50	C <sub>1</sub>	0,6665	0,4954	0,4532	0,7246	1,0134
	C <sub>2</sub>	-4,1615	-4,2869	-4,2210	-4,0883	-3,8567
	R <sup>2</sup>	0,976	0,964	0,905	0,901	0,943
60	C <sub>1</sub>	-	-	1,1626	1,2312	1,1307
	C <sub>2</sub>	-	-	-3,9373	-3,7965	-3,9109
	R <sup>2</sup>	-	-	0,878	0,962	0,855

Die aus 9 Einzelversuchen ermittelten Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Asphalttragschicht-Varianten mit 50 M.-% Asphaltgranulat sind in Abbildung 4-26 dargestellt. Das Ermüdungsverhalten der „in situ“ verdichteten Asphalttragschicht-Variante ist vergleichbar mit der großtechnisch hergestellten Variante MA. Für die in situ verdichtete Variante werden bei Dehnungen kleiner 0,05 ‰ höhere Lastwechselzahlen festgestellt, bei Dehnungen größer 0,05 ‰ geringere (vgl. Regressionspara-

meter  $C_2$ , der die Steigung des dargestellten Funktionsverlaufes angibt). Die mit den Labormischverfahren ZMZ, GZM und SRM hergestellten Mischgut-Varianten weisen einen geringfügigen Versatz in der Ermüdungsfunktion auf. Im dargestellten Dehnungsbereich von ca. 0,04 – 0,17 ‰ kann folgende Reihung hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens abgeleitet werden kann: GZM > ZMZ > SRM.

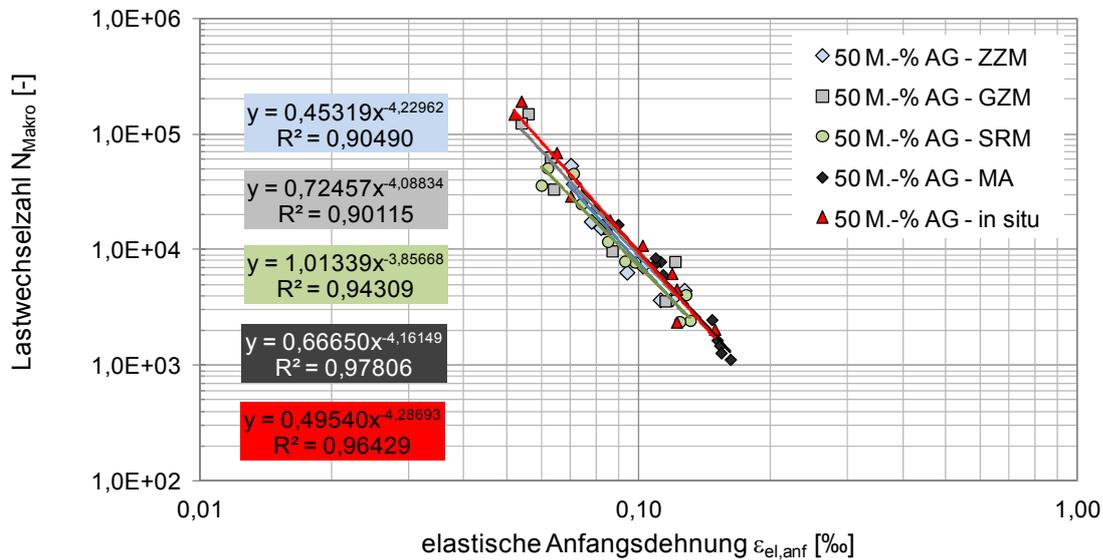


Abbildung 4-26. Mittels Spaltzug-Schwellversuch ermittelte Ermüdungsfunktionen am Beispiel der Mischgut-Varianten AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat bei 20 °C und 10 Hz.

Die Auswirkungen der Labormischverfahren auf das Mischgut hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens mittels Spaltzug-Schwellversuch bei variierenden Zugabeanteilen von Asphaltgranulat kann Abbildung 4-27 entnommen werden.

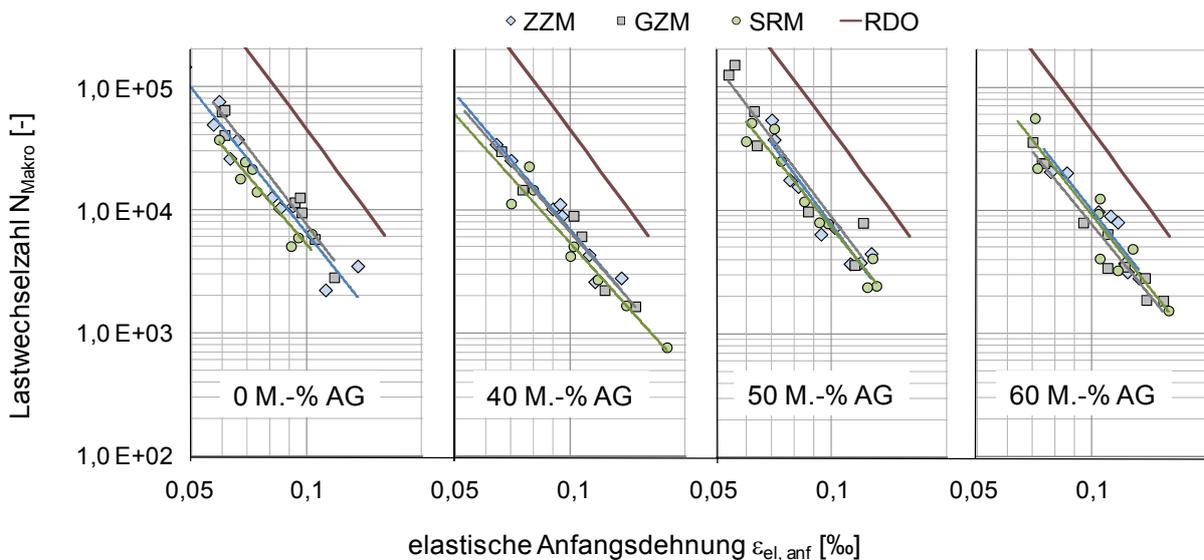
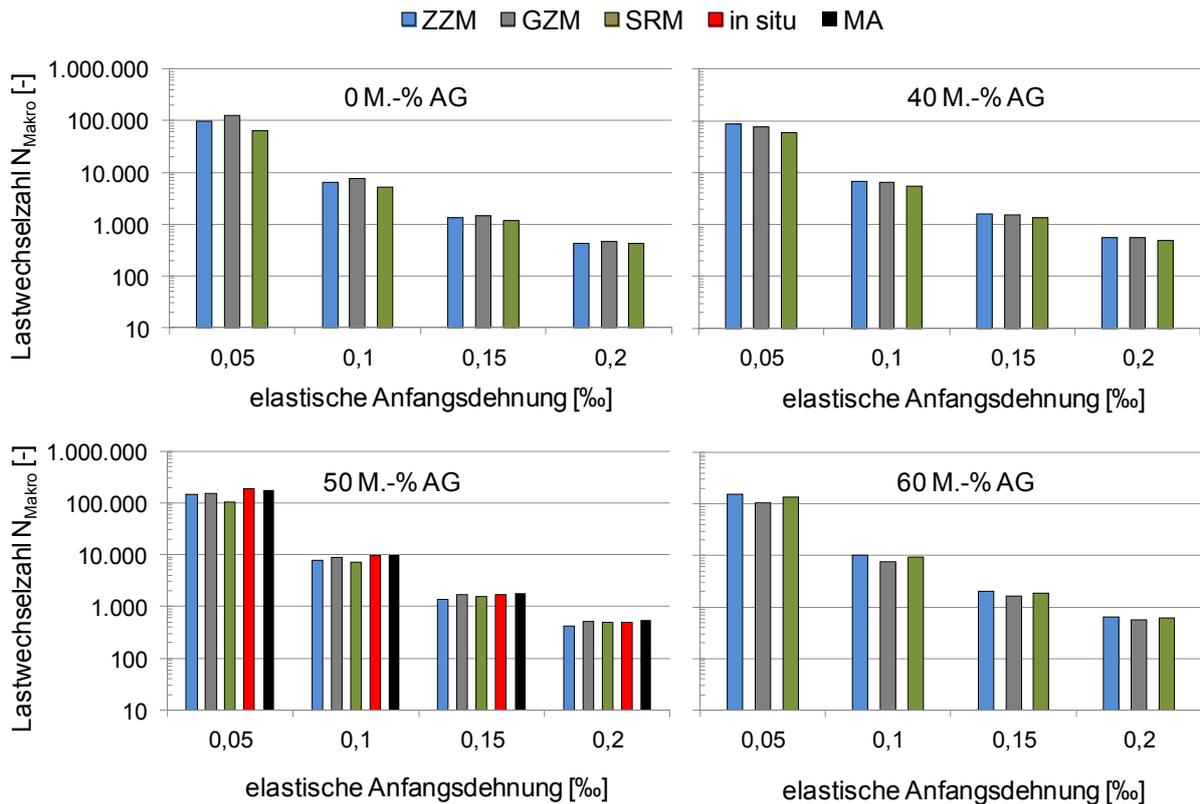


Abbildung 4-27. Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S unter Variation des Labormischverfahrens und der Zugabeanteile von Asphaltgranulat (0, 40, 50 und 60 M.-% AG); Kalibrier-Asphalt gemäß RDO als Referenz.

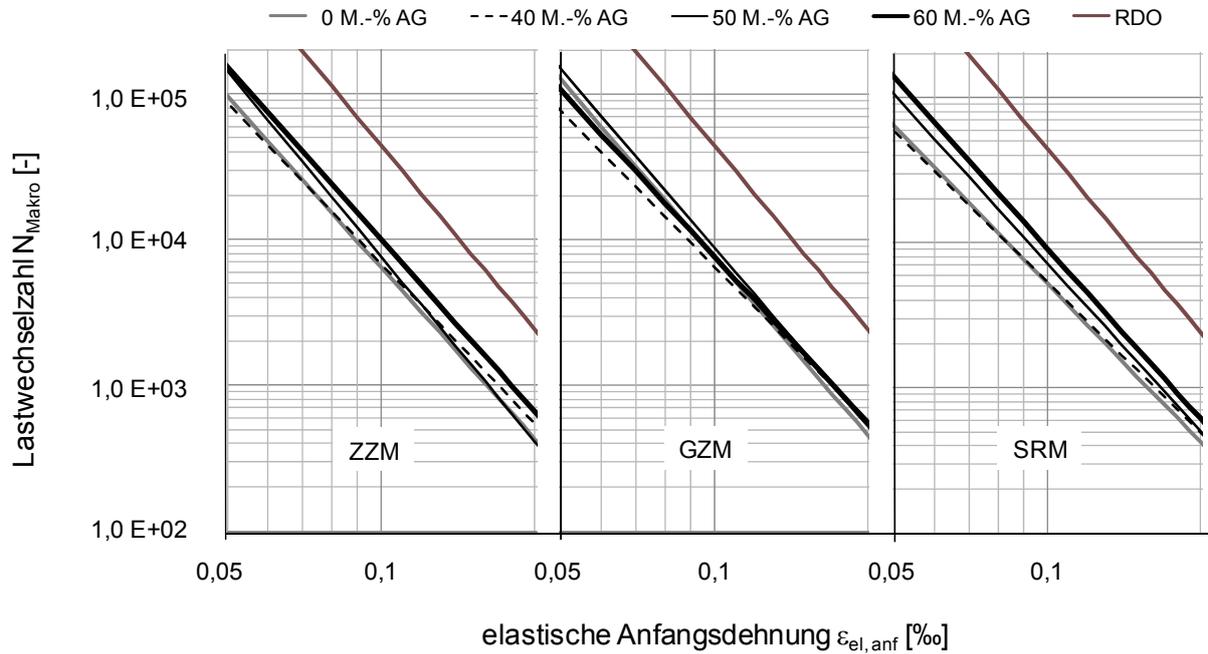
Tendenziell werden für das mittels SRM hergestellte Mischgut die geringsten Lastwechselzahlen (Ausnahme 60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) festgestellt, für das mittels GZM hergestellte Mischgut die höchsten. Bei 50 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe werden mit den „in situ“ verdichteten und den großtechnisch hergestellten Asphalttragschicht-Varianten MA vergleichbare Lastwechselzahlen bei unterschiedlichen elastischen Anfangsdehnungen erzielt. Insbesondere bei kleinen Dehnungen erweisen sich diese beiden Varianten als vorteilhaft gegenüber den Mischgut-Varianten der Labormischverfahren (vgl. Abbildung 4-28).



**Abbildung 4-28. Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüftemperatur von 20 °C und einer Prüffrequenz von 10 Hz bei variierenden Zugabeanteilen von Asphaltgranulat.**

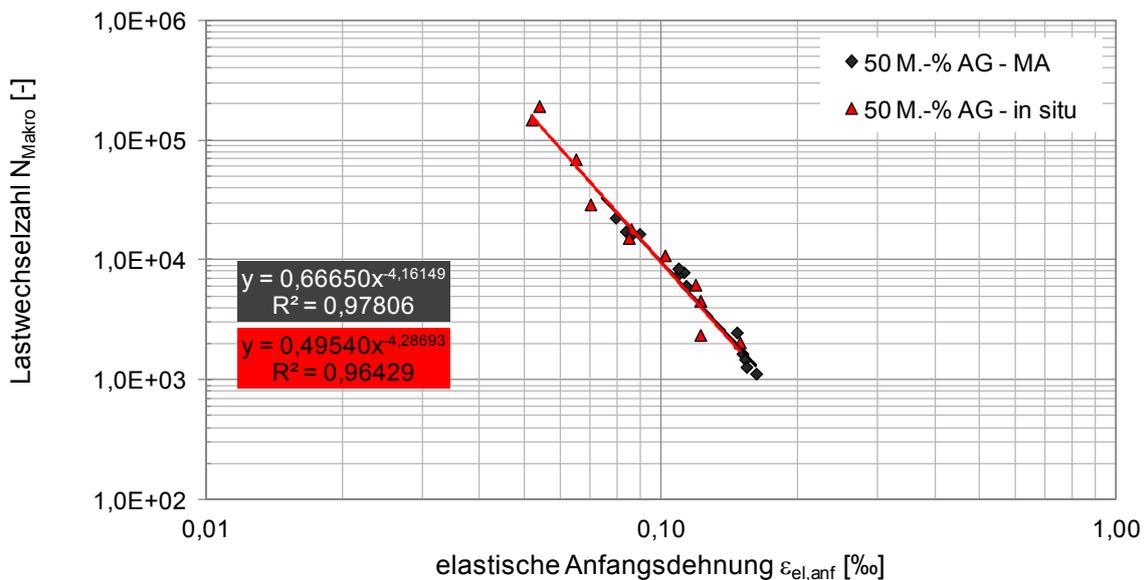
Abbildung 4-29 zeigt die Auswirkungen variierender Zugabeanteile von Asphaltgranulat auf das Ermüdungsverhalten je Labormischverfahren. Unabhängig vom eingesetzten Labormischverfahren weisen Asphalt-Varianten mit einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat nachteilige Ermüdungseigenschaften im Vergleich zu den Varianten mit erhöhten Zugabeanteilen auf. Bei den Labormischverfahren ZMZ und SRM werden für die Varianten mit einem Zugabeanteil von 0 M.-% Asphaltgranulat vergleichbare Ermüdungsfunktionen wie die Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat erzielt. Ein höherer Zugabeanteil von Asphaltgranulat bringt tendenziell eine Verbesserung der Ermüdungseigenschaften im dargestellten Dehnungsbereich. Beim GZM wirkt sich die Zugabe von Asphaltgranulat von 40 und 60 M.-% tendenziell nachteilig im Vergleich zu den Varianten ohne Zugabe von Asphaltgranulat aus, da insbeson-

dere bei geringen elastischen Anfangsdehnungen höhere Lastwechselzahlen festgestellt werden.



**Abbildung 4-29.** Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 32 T S unter Verwendung variierender Zugabeanteile von Asphaltgranulat (0, 40, 50 und 60 M.-% AG) je Labormischverfahren (ZMZ links; GZM Mitte; SRM rechts).

In Abbildung 4-30 sind die Ermüdungsfunktionen der Mischgut-Varianten MA und „in situ“ mit einem Zugabeanteil an Asphaltgranulat von 50 M.-% dargestellt.



**Abbildung 4-30.** Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Variante AC 32 T S MA und „in situ“ mit einem Zugabeanteil von 50 M.-% Asphaltgranulat.

Die dargestellten Ermüdungsfunktionen der beiden Asphalttragschicht-Varianten weisen hohe Bestimmtheitsmaße von 98 und 96 % auf. Sie sind annähernd deckungsgleich und somit miteinander vergleichbar. Aufgrund der Unterschiede in den Parametern  $C_1$  und  $C_2$  ergeben sich allerdings Unterschiede in den Ergebnissen der rechnerischen Dimensionierung.

Um den Einfluss des Labormischverfahrens hinsichtlich der Prüfstreuung zu beurteilen, werden in Analogie zur Ermüdungsprüfung mittels Zug-Schwellversuch die erzielten Lastwechselzahlen beim Abbruchkriterium  $N_{\text{Makro}}$  betrachtet, d. h. der Ermüdungsversuch wird entgegen den AL Sp-Asphalt 09 nicht dehnungsabhängig, sondern spannungsabhängig ausgewertet. Tabelle 4-25 zeigt die so erzielten Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  mit zugehörigen Oberspannungen  $\sigma_o$  und korrespondierenden Standardabweichungen bei einer Prüftemperatur von 20 °C.

**Tabelle 4-25: Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  und Standardabweichungen bei +20 °C für die Mischgut-Varianten AC 32 T S unter Verwendung von Asphaltgranulat in der Spaltzug-Schwellprüfung bei spannungsabhängiger Auswertung**

M.-% AG	$\sigma_o$	ZMZ			GZM			SRM		
		$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]	$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]	$N_{\text{Makro}}$	Stabw [LW]	Stabw [%]
40 %	0,50	28.515	4.755	16,68%	19.708	8.749	44,39%	16.088	5.813	36,14%
	0,65	10.050	1.083	10,78%	6.453	2.321	35,97%	5.175	1.034	19,99%
	0,80	3.237	934	28,87%	1.938	414	21,35%	1.719	976	56,77%
50 %	0,40	-	-	-	153.010	30.637	20,02%	-	-	-
	0,50	41.743	10.289	24,65%	53.225	17.198	32,31%	35.530	10.345	29,12%
	0,65	6.813	603	8,85%	-	-	-	9.183	2.240	24,40%
	0,70	-	-	-	4.274	947	22,16%	-	-	-
	0,80	3.967	423	10,65%	-	-	-	2.970	960	32,33%
60 %	0,50	-	-	-	28.004	6.779	24,21%	31.662	21.147	66,79%
	0,60	19.338	1.786	9,24%	-	-	-	-	-	-
	0,65	-	-	-	-	-	-	8.616	4.243	49,25%
	0,70	-	-	-	7.177	1.097	15,28%	-	-	-
	0,75	8.913	875	9,82%	-	-	-	-	-	-
	0,80	-	-	-	-	-	-	3.214	1.662	51,72%
	0,90	3.223	452	14,01%	2.176	556	25,54%	-	-	-

Die geringsten Prüfstreuungen (Standardabweichung in %), unter Einsatz der dargestellten Zugabeanteile an Asphaltgranulat, sind durch das Labormischverfahren mittels ZMZ festzustellen. Bei Zugabeanteilen von 40 bzw. 50 M.-% Asphaltgranulat weisen die Labormischverfahren GZM und SRM vergleichbare Prüfstreuungen auf. Insbesondere bei einem Zugabeanteil von 60 M.-% Asphaltgranulat weist die mittels SRM hergestellte Asphaltmischgut-Variante die größten Prüfstreuungen auf.

#### b) Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)

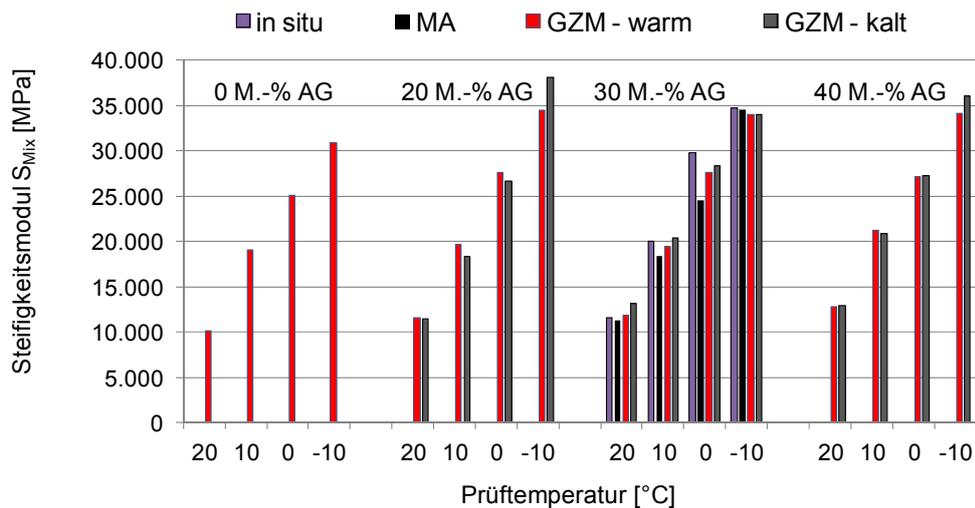
Die Steifigkeitsmoduln für die Mischgut-Varianten AC 32 T N bestimmt mittels Spaltzug-Schwellversuch bei den Prüftemperaturen +20, +10, 0, und -10 °C sowie bei ei-

ner Prüffrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 4-26 angegeben. Abbildung 4-31 gibt die Ergebnisse graphisch wieder.

**Tabelle 4-26: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen [MPa] für die Mischgut-Varianten AC 32 T N mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz**

Zugabeanteil AG [M.-%]	T [°C]	MA	Steifigkeit [MPa]		
			in situ	GZM - warm	GZM- kalt
0	20	-	-	10.109	
	10	-	-	19.058	
	0	-	-	25.088	
	-10	-	-	30.846	
20	20	-	-	11.551	11.511
	10	-	-	19.623	18.364
	0	-	-	27.568	26.618
	-10	-	-	34.433	38.124
30	20	11.329	11.626	11.831	13.187
	10	18.376	20.018	19.475	20.332
	0	24.501	29.834	27.678	28.297
	-10	34.611	34.786	34.064	34.039
40	20	-	-	12.822	12.944
	10	-	-	21.273	20.853
	0	-	-	27.184	27.211
	-10	-	-	34.109	36.112

Tendenziell werden für die Asphalt-Varianten mit Zugabe von Asphaltgranulat höhere Steifigkeitsmoduln als die Varianten ohne Zugabe von Asphaltgranulat festgestellt. Das Zugabeverfahren beeinflusst die Steifigkeitsmoduln bei den Prüftemperaturen 20, 10 und 0 °C nur unwesentlich. Bei -10 °C kommt es zu erhöhten Steifigkeiten durch die Kaltzugabe bei einem Zugabeanteil von Asphaltgranulat von 20 und 40 M.-%. Die „in situ“ verdichtete Asphalttragschicht-Variante zeigt im Vergleich zu der großtechnisch hergestellten Variante MA tendenziell höhere Steifigkeitsmoduln. Auffällig erscheint der vergleichsweise geringe Steifigkeitsmodul der Variante MA bei einer Temperatur von 0 °C.



**Abbildung 4-31. Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen unter Variation des Zugabeverfahrens und des Zugabeanteils von Asphaltgranulat für die Mischgut-Varianten AC 32 T N mittels Spaltzug-Schwellversuch bei einer Prüffrequenz von 10 Hz.**

Unter Verwendung von Gleichung 3-19 und unter Berücksichtigung aller Prüffrequenzen zur Ermittlung des Steifigkeitsmoduls können nachfolgende Regressionsparameter der Sigmoidfunktionen abgeleitet werden (Tabelle 4-27).

**Tabelle 4-27: Regressionsparameter  $y_0$ ,  $w$ ,  $x_0$ ,  $z$  der Sigmoidfunktionen je AC 32 T N – Variante**

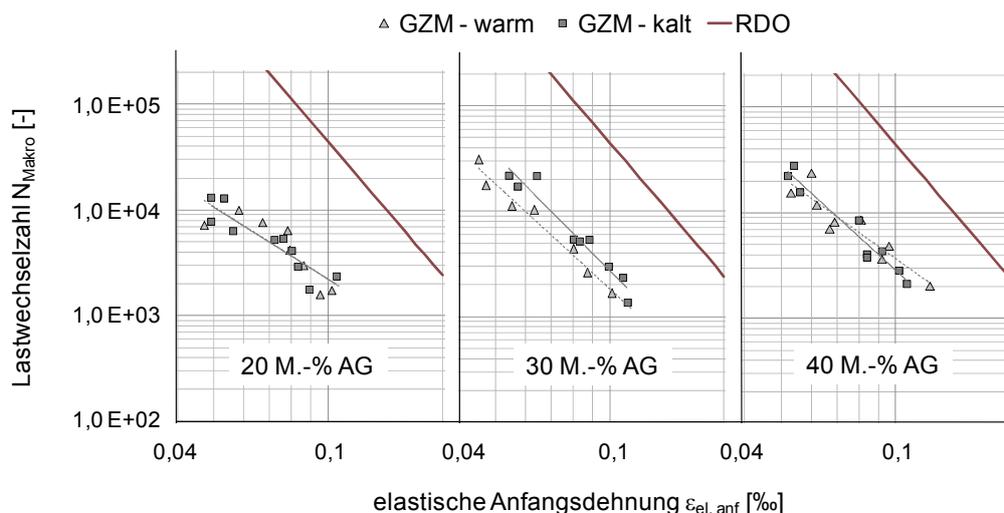
Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]	MA	in situ	GZM - warm	GZM - kalt
0	$y_0$	-	-	-3.395,83	-
	$w$	-	-	38.843,63	-
	$x_0$	-	-	0,63	-
	$z$	-	-	1,74	-
20	$y_0$	-	-	-1.020,64	-5.719,27
	$w$	-	-	37.609,08	60.681,84
	$x_0$	-	-	0,59	1,78
	$z$	-	-	1,37	2,22
30	$y_0$	-3.161,15	-2.054,33	-2.635,21	-2.094,65
	$w$	47.623,24	40.490,40	42.428,80	40.236,15
	$x_0$	1,30	0,67	0,731	0,50
	$z$	1,99	1,63	1,66	1,63
40	$y_0$	-	-	-3.518,28	-4.740,28
	$w$	-	-	43.907,33	51.338,75
	$x_0$	-	-	0,54	1,02
	$z$	-	-	1,87	2,10

Die Parameter der Regressionsfunktion für die Prüf­temperatur +20 °C und die Prüf­frequenz 10 Hz sind für die Mischgut-Varianten AC 32 T N in Tabelle 4-28 wiedergegeben. Die Ermüdungsfunktionen aller im Labor hergestellten Asphalt­tragschicht-Varianten haben Bestimmtheitsmaße von über 80 % (ausgenommen Variante „GZM – warm“ bei einem Zugabeanteil von 20 M.-% Asphaltgranulat; kursiv gedruckt). Die Ermüdungsfunktionen von Warm- bzw. Kaltzugabe bei 20 M.-% Asphaltgranulatzugabe sind annähernd deckungsgleich.

**Tabelle 4-28: Regressionsparameter  $C_1$ ,  $C_2$  und Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der Ermüdungsfunktionen aus dem Spaltzug-Schwellversuch je AC 32 T N – Variante**

Zugabeanteil AG [M.-%]	Regressionsparameter [-]	MA	in situ	GZM - warm	GZM - kalt
0	$C_1$	-	-	9,2088	-
	$C_2$	-	-	-2,6134	-
	$R^2$	-	-	0,870	-
20	$C_1$	-	-	11,5841	12,1730
	$C_2$	-	-	-2,2801	-2,2587
	$R^2$	-	-	0,716	0,824
30	$C_1$	19,2705	2,5800	0,9188	0,6283
	$C_2$	-2,2657	-2,8440	-3,2991	-3,6361
	$R^2$	0,967	0,953	0,971	0,944
40	$C_1$	-	-	9,8709	1,4526
	$C_2$	-	-	-2,5705	-3,2921
	$R^2$	-	-	0,847	0,942

In Abbildung 4-32 sind die Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 32 T N unter Verwendung variierender Zugabeanteile von Asphaltgranulat (20, 30 und 40 M.-% AG) für Warm- und Kaltzugabe dargestellt (Ermüdungsfunktion des Kalibrierasphaltes der RDO als Referenz).

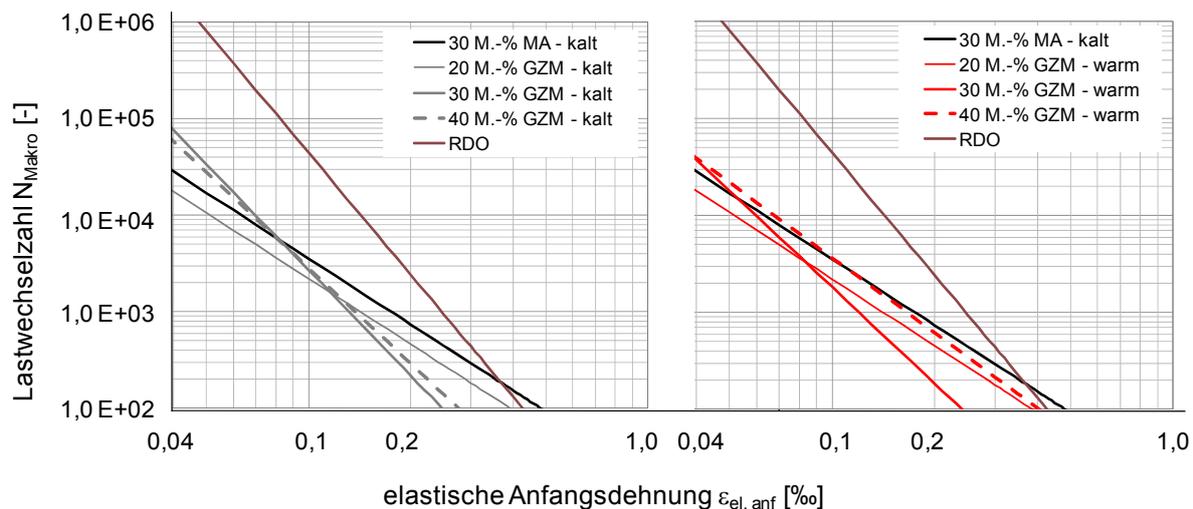


**Abbildung 4-32. Ermüdungsfunktionen für die AC 32 T N - Varianten unter Verwendung variierender Zugabeanteile von Asphaltgranulat (20, 30 und 40 M.-% AG) für Warm- und Kaltzugabe.**

Unabhängig vom Zugabeverfahren werden für die Varianten mit einem Zugabeanteil von 20 M.-% Asphaltgranulat annähernd gleiche Verläufe der Ermüdungsfunktion festgestellt. Bei einem Anteil an Asphaltgranulat von 30 M.-% sind die ermittelten Ermüdungsfunktionen parallel verschoben. Die Varianten bei Kaltzugabe (GZM - kalt) erreichen bei gleicher Dehnung höhere Lastwechselzahlen und wären demzufolge bezüglich der Ermüdungsbeständigkeit als vorteilhaft gegenüber der Warmzugabe einzustufen. Bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% an Asphaltgranulat ergibt sich ein Schnittpunkt der dargestellten Ermüdungsfunktionen bei einer Dehnung von

ca. 0,7 ‰. Im Dehnungsbereich kleiner 0,7 ‰ werden bei Kaltzugabe höhere Lastwechselzahlen festgestellt als bei Warmzugabe, dann kehrt sich das Verhältnis um.

Abbildung 4-33 veranschaulicht die Auswirkungen der Variationen des Zugabeanteils von Asphaltgranulat und der Zugabeverfahren. Die Lastwechselzahlen für den Dehnungsbereich von 0,04 bis 1,0 ‰ sind extrapoliert (Parameter der Potenzfunktion sh. Tabelle 4-28). Zusätzlich sind die Ermüdungsfunktionen der großtechnisch hergestellten Asphalt Variante MA und jene des RDO Kalibrierasphaltes dargestellt.

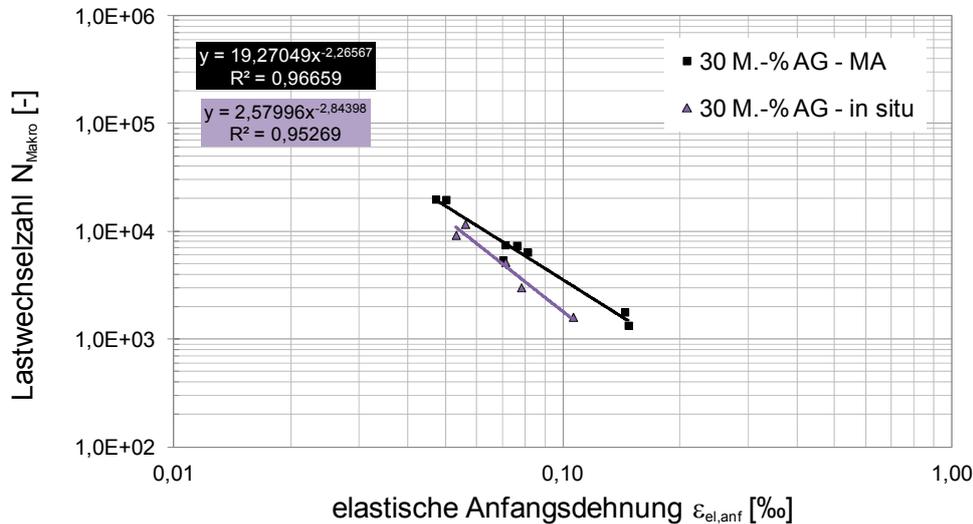


**Abbildung 4-33. Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 32 T N unter Verwendung variierender Zugabeanteile von Asphaltgranulat (20, 30 und 40 M.-% AG) für die Zugabeverfahren Kalt (links) und Warm (rechts).**

Für die Kaltzugabe erweisen sich die Zugabeanteile mit 30 und 40 M.-% Asphaltgranulat tendenziell als vorteilhaft bezüglich der Ermüdungsbeständigkeit gegenüber den Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat bei Dehnungen kleiner 0,12 ‰. Die großtechnisch hergestellte Asphalttragschicht Variante MA ist gleichsam parallel verschoben zu der Variante mit 20 M.-% Asphaltgranulat. Für die Warmzugabe erweist sich der Zugabeanteil mit 30 M.-% Asphaltgranulat bei Dehnungen kleiner 0,08 ‰ als vorteilhaft bezüglich der Ermüdungsbeständigkeit gegenüber der Variante mit 20 M.-%. Ein Asphaltgranulatanteil von 40 M.-% bringt im untersuchten Dehnungsbereich eine Verbesserung in den Ermüdungseigenschaften. Die Ermüdungsfunktion der Variation 40 M.-% GZM – warm zeigt gegenüber der großtechnisch hergestellten Asphalttragschicht Variante MA ein verbessertes Ermüdungsverhalten bei Dehnungen kleiner 0,1 ‰. Die Asphalt-Varianten mit einem Zugabeanteil von 20 M.-% Asphaltgranulat erweisen sich als nachteilig bezüglich der Ermüdungsbeständigkeit gegenüber den Varianten mit höheren Zugabeanteilen bei Dehnungen kleiner 0,08 ‰.

In Abbildung 4-34 sind die Ermüdungsfunktionen der Mischgut-Varianten AC 32 T N „MA“ und „in situ“ mit einem Zugabeanteil an Asphaltgranulat von 30 M.-% dargestellt. Die Ermüdungsfunktionen weisen hohe Bestimmtheitsmaße von 97 % und 95 % auf (Hinweis: bei der Variante „in situ“ sind nur 6 Bohrkernproben berücksich-

tigt). Der Schnittpunkt der Ermüdungsfunktionen liegt bei einer Dehnung von ca. 0,045 ‰. Bei Dehnungen kleiner 0,045 ‰ ergeben sich höhere ertragbare Lastwechselzahlen bei der Asphalttragschicht-Variante „in situ“, bei Dehnungen größer 0,045 ‰ werden geringere Lastwechselzahlen festgestellt.



**Abbildung 4-34. Ermüdungsfunktionen für die Mischgut-Varianten AC 32 T N mit einem Zugabeanteil von 30 M.-% Asphaltgranulat (MA und „in situ“).**

Letztlich ist aber eine Bewertung der Ermüdungsbeständigkeit in Abhängigkeit vom Zugabeverfahren und des Zugabeanteils an Asphaltgranulat ohne die Einbeziehung der jeweiligen Steifigkeiten nicht vollständig. Zielführend ist hier die Bewertung eines aus den zu beurteilenden Asphalten zusammengesetzten Straßenaufbaus anhand der Rechnerischen Dimensionierung (RDO Asphalt 09; FGSV, 2010) (sh. Kapitel 4.3.2).

## 4.2 Bindemittleigenschaften

### 4.2.1 Kenngrößen der Frischbindemittel

Nachfolgend sind die Eigenschaften der Straßenbaubitumen 30/45 und 50/70 dargestellt.

**Tabelle 4-29: Straßenbaubitumen 30/45; Zielbindemittel der Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)**

Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]		1000,0
	Max. Kraft [N]		2,0
	Verformungsarbeit	$W_{\text{gesamt}}$ [J/cm <sup>2</sup> ]	0,1914
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm <sup>2</sup> ]	0,1346
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm <sup>2</sup> ]		0,0080	
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]			55,4
Nadelpenetration [0,1 mm]			40,0
elastische Rückstellung [%]			18,0
DSR (60 °C; 1,59 Hz)	Phasenwinkel [°]		72,5
	komplexer Schermodul [Pa]		20.039
BBR (-10 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		88,2
	m-Wert [-]		0,458
BBR (-16 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		219,7
	m-Wert [-]		0,407
BBR (-25 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		712,4
	m-Wert [-]		0,123
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]		-18,0

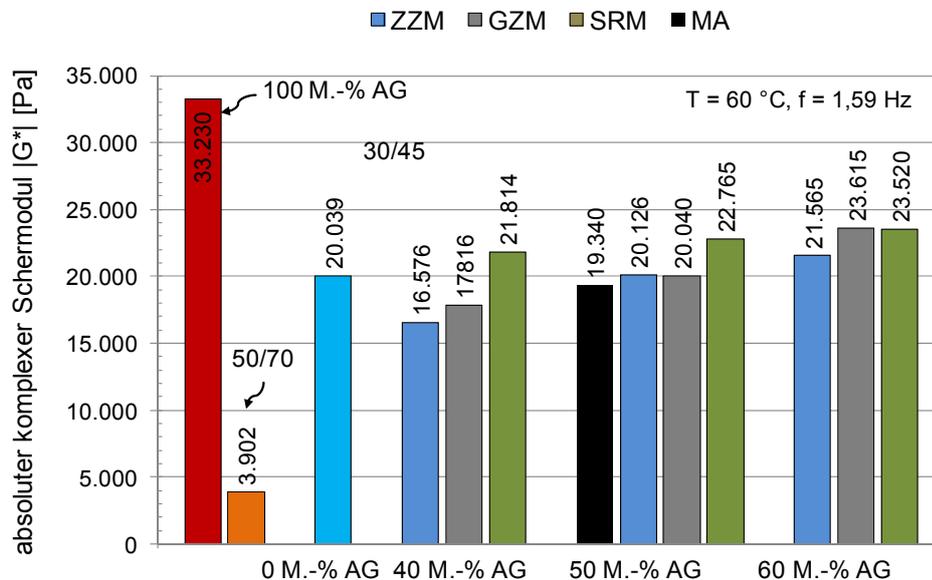
**Tabelle 4-30: Straßenbaubitumen 50/70; Zielbindemittel der Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)**

Kraftduktilität 25 °C	Duktilität [mm]		1000,0
	Max. Kraft [N]		1,5
	Verformungsarbeit	$W_{\text{gesamt}}$ [J/cm <sup>2</sup> ]	0,1070
		$W_{0-0,2m}$ [J/cm <sup>2</sup> ]	0,09635
$W_{0,2-0,4m}$ [J/cm <sup>2</sup> ]		0,00755	
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]			51,9
Nadelpenetration [mm/10]			50,0
elastische Rückstellung [%]			9,5
DSR (60 °C; 1,59 Hz)	Phasenwinkel [°]		77,7
	komplexer Schermodul [Pa]		8.950
BBR (-10 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		60,6
	m-Wert [-]		0,510
BBR (-16 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		154,2
	m-Wert [-]		0,426
BBR (-25 °C)	Kriechsteifigkeit S [MPa]		582,1
	m-Wert [-]		0,278
BBR	T bei S = 300 MPa [°C]		-20,0

## 4.2.2 Kenngrößen der rückgewonnenen Bindemittel

### a) Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

In Abbildung 4-35 sind die mittels DSR ermittelten, komplexen Schermoduln  $G^*$  (bei 60 °C und 1,59 Hz) der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 50/70) dargestellt.



**Abbildung 4-35. Komplexe Schermoduln  $G^*$  (@ 60°C und 1,59 Hz) der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 50/70).**

Erwartungsgemäß wird der größte Schermodul  $G^*$  am rückgewonnenen Bindemittel aus dem Asphaltgranulat (100 M.-% AG) ermittelt, der geringste am Frischbindemittel 50/70.

Das extrahierte Bindemittel der Mischgut-Variante ohne Asphaltgranulat (0 M.-% AG) hat einen komplexen Schermodul von  $G^* = 20.039$  Pa. Dieser Wert entspricht etwa jenem Schermodul, der für das extrahierte Bindemittel aus den Mischgut-Varianten AC 32 T S mit einem Zugabeanteil von 50 M.-% Asphaltgranulat festgestellt wird. Eine Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat von 40 auf bis zu 60 M.-% geht mit einer Erhöhung des absoluten komplexen Schermoduls einher.

Abbildung 4-36 gibt die Ergebnisse der prozentualen Rückverformung des Bindemittels aus dem MSCR-Test bei der Belastungsstufe 100 Pa wieder. Da mit zunehmendem komplexen Schermodul der elastische Anteil des Materials zunimmt, ist bei steiferen Bitumen eine höhere Rückverformung im MSCR-Test plausibel. Die in Abbildung 4-36 dargestellten Ergebnisse spiegeln jene aus Abbildung 4-35 wider.

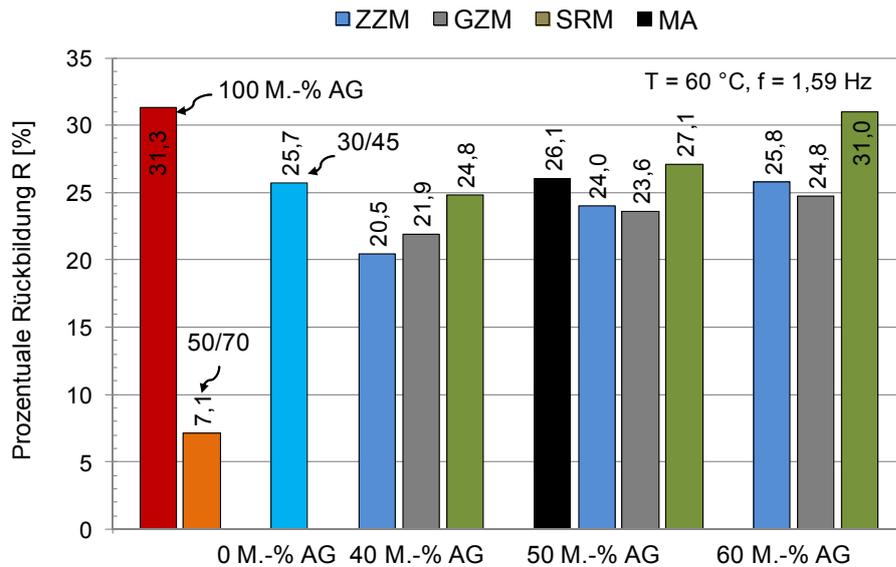


Abbildung 4-36. Prozentuale Rückbildung aus dem MSCRT der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 50/70).

In Abbildung 4-37 ist der absolute komplexe Schermodul  $G^*$  im Tieftemperaturbereich für die aus der Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 50/70) dargestellt.

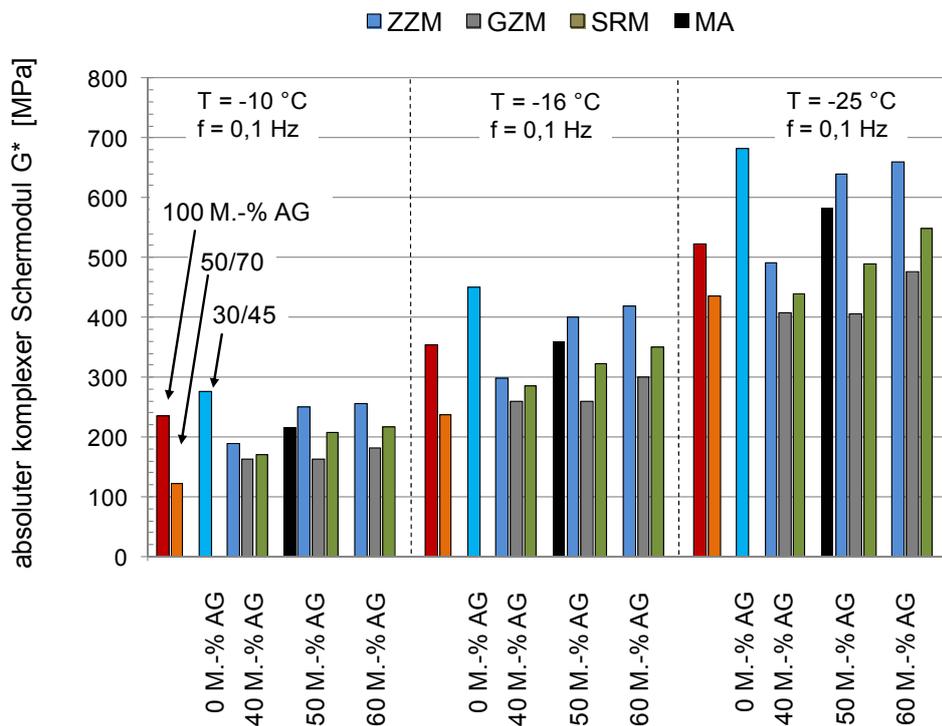


Abbildung 4-37. Komplexe Schermoduln  $G^*$  (Oszillation @ T = -10, -16, -25 °C; f = 0,1 Hz; 4 mm Platte-Platte-Messgeometrie) der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 50/70).

Für jede Prüftemperatur ist jeweils die gleiche Reihung der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Labormischverfahren und dem Zugabeanteil an Asphaltgranulat festzustellen. Die höchsten absoluten komplexen Schermoduln werden bei den Bindemitteln der Mischgut-Variante mit 0 M.-% Asphaltgranulatzugabe erzielt. Eine Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat bewirkt eine Erhöhung des komplexen Schermoduls. Zudem zeigt sich eine Abhängigkeit der komplexen Schermoduln in Bezug zum Labormischverfahren. Bei unterschiedlichen Zugabeanteilen an Asphaltgranulat zeigt das rückgewonnene Bindemittel aus dem Labormischverfahren ZZM die größten Werte.

b) Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)

In Abbildung 4-38 sind die komplexen Schermoduln  $G^*$  der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T N zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 70/100) dargestellt.

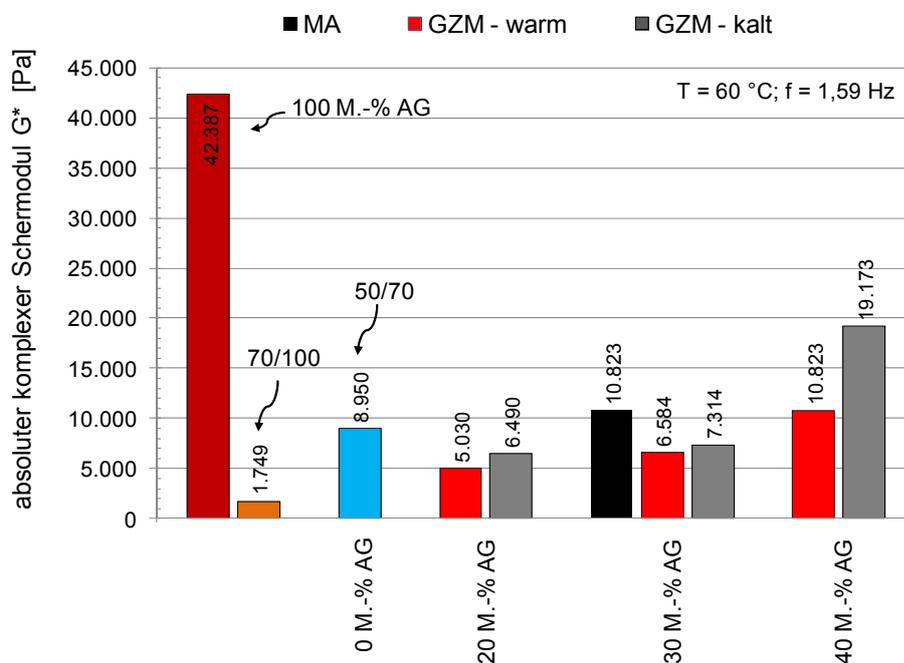


Abbildung 4-38. Komplexe Schermoduln  $G^*$  (@ 60°C und 1,59 Hz) der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T N zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 70/100).

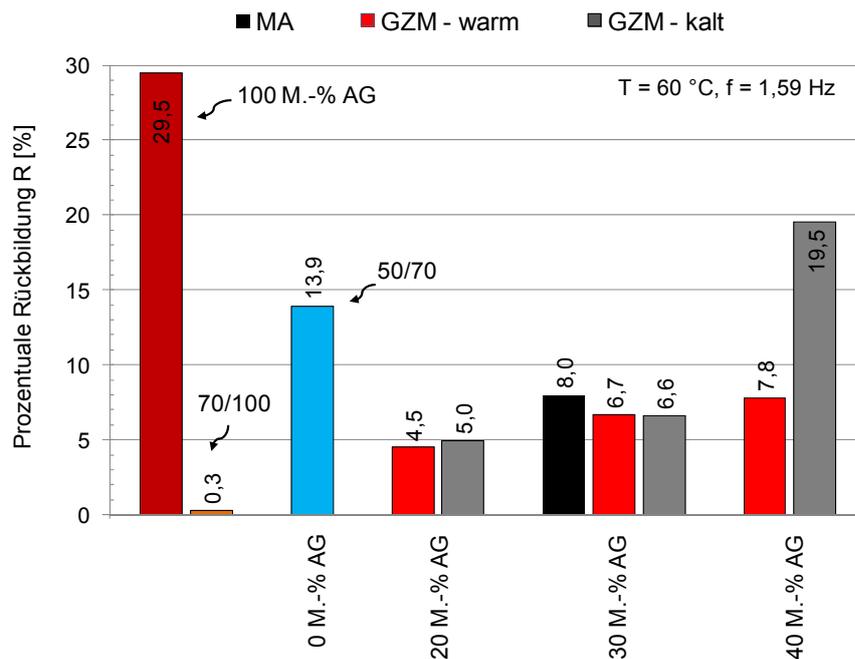
Eine Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat von 20 auf bis zu 40 M.-% führt unabhängig vom Zugabeverfahren zu einer Erhöhung des Schermoduls. Die Mischgut-Variante mit 40 M.-% Asphaltgranulat bei Kaltzugabe bringt annähernd eine Verdopplung des komplexen Schermoduls gegenüber der Variante mit 40 M.-% Asphaltgranulat bei Warmzugabe.

Das extrahierte Bitumen der Mischgut-Variante 0 M.-% AG erzielt einen komplexen Schermodul  $G^*$  von 8.950 Pa. Dieser Wert entspricht annähernd den ermittelten Schermoduln der aus den Mischgut-Varianten AC 32 T N mit einem Zugabeanteil von 30 M.-% Asphaltgranulat extrahierten Bindemittel, wobei das rückgewonnenen Bi-

tumen der Mischgut-Variante MA den höchsten Schermodul erzielt, das zurückgewonnene Bitumen der Warmzugabe den geringsten.

Erwartungsgemäß wird der größte Schermodul  $G^*$  am rückgewonnenen Bindemittel aus dem Asphaltgranulat (100 M.-% AG) ermittelt, der geringste am Frischbindemittel 70/100.

In Abbildung 4-39 sind die Ergebnisse der prozentualen Rückverformung des Bindemittels aus dem MSCR-Test bei der Belastungsstufe 100 Pa dargestellt. Die in Abbildung 4-39 dargestellten Ergebnisse spiegeln jene aus Abbildung 4-38 wider.



**Abbildung 4-39. Prozentuale Rückbildung R aus dem MSCRT der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T N zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 70/100).**

In Abbildung 4-40 sind die absoluten komplexen Schermoduln  $G^*$  im Tieftemperaturbereich der aus der Mischgut-Variante AC 32 T N zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 70/100) dargestellt.

Für jede Prüftemperatur ist jeweils die gleiche Reihung der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Labormischverfahren und dem Zugabeanteil an Asphaltgranulat festzustellen. Im Vergleich zur Prüftemperatur von 60 °C bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz weist entgegen der Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) das rückgewonnene Bindemittel aus dem Asphaltgranulat den höchsten Schermodul auf. Eine Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat bewirkt eine geringfügige Erhöhung des komplexen Schermoduls. Es zeigt sich keine einheitliche Abhängigkeit der komplexen Schermoduln in Bezug zum Zugabeverfahren.

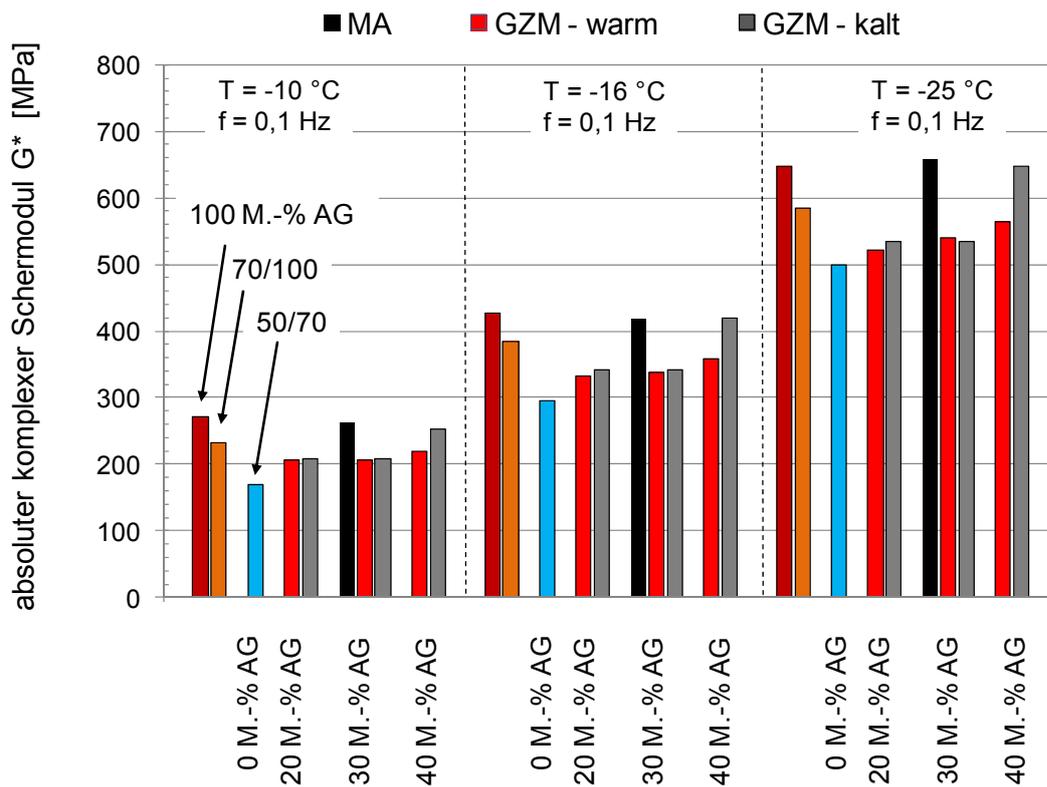


Abbildung 4-40. Absolute komplexe Schermoduln  $G^*$  (Oszillation @  $T = -10, -16, -25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $f = 0,1 \text{ Hz}$ ; 4 mm Platte-Platte-Messgeometrie) der aus den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T N zurückgewonnenen Bindemittel (Frischbindemittel 70/100).

### 4.3 Lebensdauerprognose mittels rechnerischer Dimensionierung

Mittels dem im Technischen Regelwerk dokumentierten Verfahren (Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht; RDO Asphalt 09) können die möglichen Auswirkungen der Wahl des Laborherstellungsverfahrens auf die prognostizierte rechnerische Lebensdauer einer Asphaltstraße untersucht werden. Die im Folgenden erläuterte Lebensdauerprognose gemäß RDO Asphalt 09 basiert im Wesentlichen auf den Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen an den Asphalttragschicht-Varianten AC 32 T S und AC 32 T N.

Zur Durchführung von Berechnungen gemäß RDO Asphalt 09 wird der in der Software PADESTO umgesetzte Berechnungsalgorithmus analog angewandt.

#### 4.3.1 Randbedingungen und Eingangsgrößen

Es werden folgende zwei Aufbauvarianten aus dem Katalog an Standardaufbauten im Technischen Regelwerk (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen; RStO 12) berücksichtigt:

- Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (RStO 12, Tafel 1, Zeile 1) und
- Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht (RStO 12, Tafel 1, Zeile 3).

Als Verkehrsbeanspruchung werden reale Daten von vier ausgewählten Bundesfernstraßen eingesetzt (durchschnittlicher täglicher Verkehr und Schwerverkehrsanteil für das Jahr 2005 aus den Jahresauswertungen von Dauerzählstellen auf Bundesfernstraßen; BAST, 2005). Die aus der Verkehrsbeanspruchung resultierenden Belastungsklassen werden nach RStO 12 bestimmt.

Es werden die Belastungsklassen Bk100, Bk32, Bk10 und Bk3,2 gemäß den RStO 12 berücksichtigt. Die Befestigung Bk100 liegt mit  $B = 211$  Mio. im sehr hohen Beanspruchungsbereich. Die Befestigungen Bk32 ( $B = 13$  Mio.) und Bk10 ( $B = 3,4$  Mio.) liegen im unteren Beanspruchungsbereich. Die Befestigung Bk3,2 liegt an der mittleren Belastungsklassengrenze.

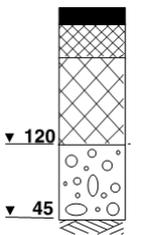
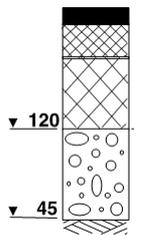
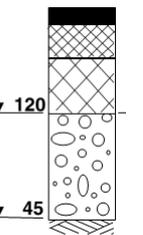
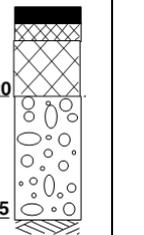
Die Eingangsgrößen zur Verkehrsbeanspruchung sind in Tabelle 4-31 zusammengestellt. Für alle Befestigungen wird eine theoretische Lebensdauer von 30 Jahren angestrebt, die bei der Ermittlung von vorh. N berücksichtigt wird.

**Tabelle 4-31: Festlegung der Belastungsklassen**

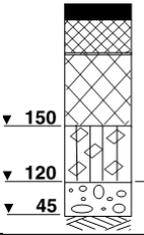
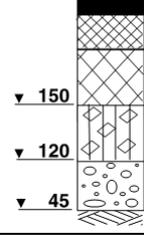
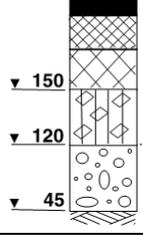
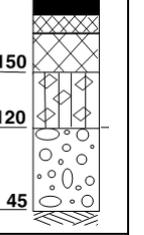
	<b>Berechnung der Belastungsklasse nach RStO 12</b>			
	<b>Bk100</b>	<b>Bk32</b>	<b>Bk10</b>	<b>Bk3,2</b>
DTV [Kfz/24h]	82.838	15.908	7.968	6.470
SV-Anteil [%]	22,1	18,7	7,7	6,4
Fahrstreifenfaktor f1 [-]	0,45	0,45	0,5	0,5
Fahrstreifenbreitenfaktor f2 [-]	1,0	1,1	1,40	1,80
Steigungsfaktor f3 [-]	1,0	1,0	1,0	1,0
Mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs p [-]	0,03	0,02	0,01	0,01
Achszahlfaktor fA [-]	4,5	4,0	3,3	3,3
Nutzungszeitraum N [a]	30	30	30	30
Lastkollektivquotient qBm [-]	0,33	0,25	0,23	0,23
Bemessungsrelevante Beanspruchung B [-]	211,48 Mio	13,49 Mio	3,4 Mio	2,7 Mio
<b>Gewählte Eingangsgrößen für die Dimensionierung nach den RDO Asphalt</b>				
Achslastkollektiv	BAB Fernverkehr	BAB Mischverkehr	BAB Stadtn. Verkehr	
Temperaturzone	Zone I			
Sicherheitsbeiwert F	2,1 / 0,6			

In Tabelle 4-32 und Tabelle 4-33 sind die untersuchten Befestigungs-Varianten dargestellt.

**Tabelle 4-32: Befestigungs-Varianten der Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht**

RStO 12, Tafel 1, Zeile 1: Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht				
Bezeichnung:	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
Aufbauskinne				
Schichtdicken [cm]				
Asphaltdeckschicht	4			
Asphaltbinderschicht	8			
Asphalttragschicht AC 32 T S / AC 32 T N	22	18	14	12
Dicke des frostsicheren Oberbaus	75			65

**Tabelle 4-33: Befestigungs-Varianten der Bauweise Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschuttschicht**

RStO 12, Tafel 1, Zeile 3: Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschuttschicht				
Bezeichnung:	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2
Aufbauskinne				
Schichtdicken [cm]				
Asphaltdeckschicht	4			
Asphaltbinderschicht	8			
Asphalttragschicht AC 32 T S / AC 32 T N	18	14	10	10
Dicke der Schottertragschicht	15			
Dicke des frostsicheren Oberbaus	75			65

#### 4.3.1.1 Ermittlung der Dicke des frostsicheren Oberbaus

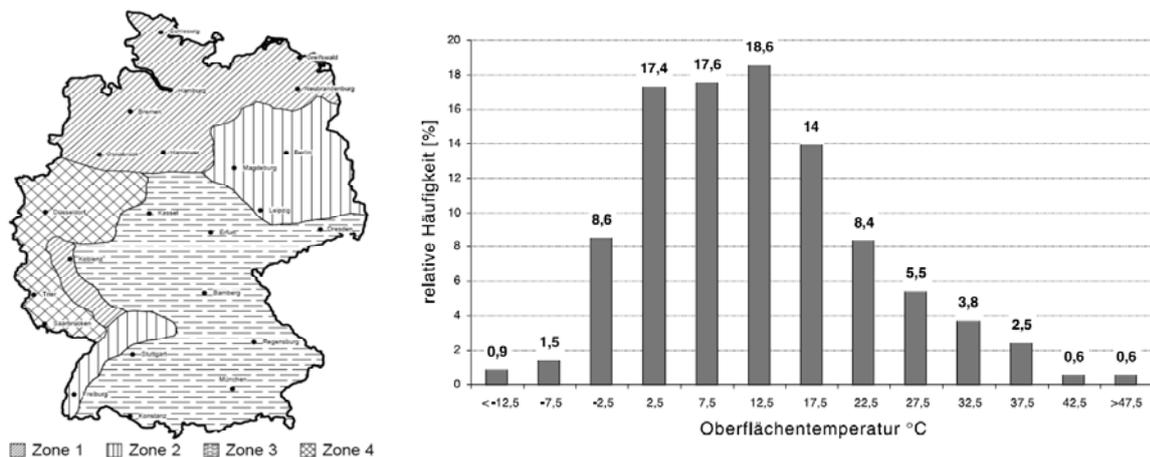
Gemäß RDO Asphalt 09 ist die Dicke des frostsicheren Oberbaus nach der in den RStO beschriebenen Methode zu ermitteln und einzuhalten. Tabelle 4-34 zeigt die getroffenen Annahmen. Der Tabelle kann eine frostsichere Mindestdicke des Oberbaus von 75 cm für die Belastungsklassen Bk100, Bk32 und Bk10 entnommen werden. Für Bk3,2 wird von einer um 5 cm verringerten Dicke des frostsicheren Oberbaus ausgegangen.

**Tabelle 4-34: Mindestdicke bzw. Mehr- und Minderdicken zur Ermittlung der Dicke des frostsicheren Oberbaus gem. RStO 12**

	Kategorie	Mindestdicke frostsicherer Oberbau / Mehr- bzw. Minderdicke [cm]
Frostempfindlichkeit Boden	F3 (in Belastungsklasse Bk100)	65 (60 für Bk3,2)
Frosteinwirkungszone	Zone II	+5
Kleinräumige Klimaunterschiede	keine besonderen Einflüsse	±0
Wasserverhältnisse	Grundwasser zeitweise höher als 1,5 m unter Planum	+5
Lage der Gradiente	Einschnitt Damm	+5
Entwässerung in Randbereichen	Rinnen und Abläufe	-5

#### 4.3.1.2 Einganggröße Temperatur

Die für die untersuchten Befestigungsvarianten angenommene Verteilung der Straßenoberflächentemperatur entspricht der in den RDO beschriebenen Temperaturzone 1 (vgl. Abbildung 4-41).



**Abbildung 4-41. Gewählte Verteilung der Straßenoberflächentemperatur gemäß Zone 1 der RDO Asphalt 09 (FGSV 2009a)**

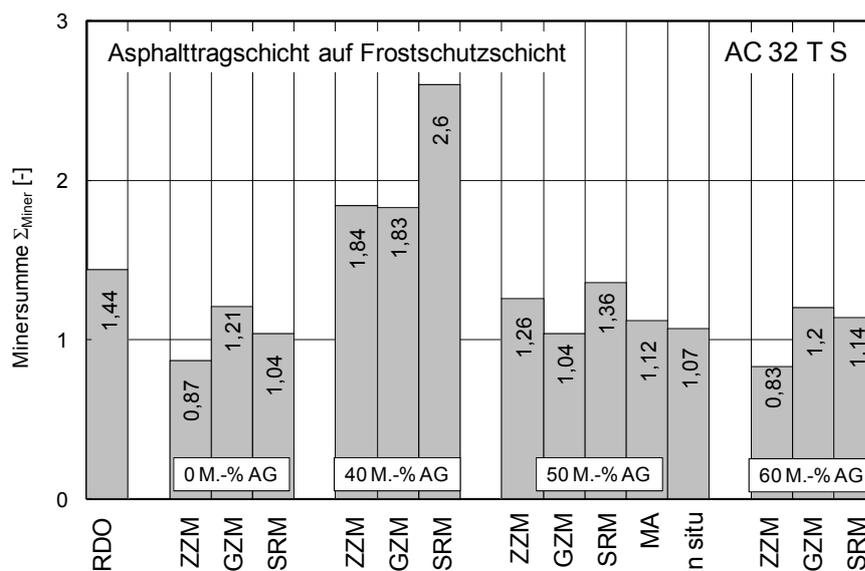
#### 4.3.2 Berechnungsergebnisse

##### a) Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S)

In Tabelle 4-35 und Tabelle 4-36 sind die Berechnungsergebnisse in Form der „Miner-Summe“ für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) wiedergegeben (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz). Abbildung 4-43 und Abbildung 4-44 geben die Ergebnisse graphisch wieder.

**Tabelle 4-35: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz)**

Belastungs- klasse [-]	Zugabeanteil AG [M.-%]	Miner-Summe [-]					
		RDO	MA	in situ	ZZM	GZM	SRM
Bk100	0	1,44	-	-	0,87	1,21	1,04
	40	-	-	-	1,84	1,83	2,60
	50	-	1,12	1,07	1,26	1,04	1,36
	60	-	-	-	0,83	1,20	1,14
Bk32	0	0,40	-	-	0,23	0,30	0,27
	40	-	-	-	0,44	0,42	0,59
	50	-	0,31	0,30	0,35	0,28	0,34
	60	-	-	-	0,21	0,30	0,29
Bk10	0	0,27	-	-	0,14	0,17	0,16
	40	-	-	-	0,25	0,23	0,32
	50	-	0,20	0,20	0,23	0,18	0,21
	60	-	-	-	0,13	0,17	0,18
Bk3,2	0	0,73	-	-	0,33	0,39	0,38
	40	-	-	-	0,54	0,49	0,66
	50	-	0,50	0,53	0,59	0,43	0,47
	60	-	-	-	0,31	0,39	0,42



**Abbildung 4-42. Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht, Belastungsklasse Bk100 (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz).**

Bei einem Zugabeanteil an Asphaltgranulat von 50 M.-% zeigt sich, dass mit dem Labormischverfahren GZM eine vergleichbare Miner-Summe zu der Variante „in situ“ erzielt wird. Die großtechnisch hergestellte Mischgut-Variante MA (im Labor mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät verdichtet) zeigt eine geringfügig höhere Miner-Summe von 1,12.

Eine Reduktion des Anteils an Asphaltgranulat auf 40 M.-% resultiert in einer für alle Labormischverfahren einheitlichen Erhöhung der Miner-Summe, was letztlich eine

Reduktion der rechnerischen Lebensdauer bedeutet. Die Mischgut-Varianten aus den Labormischverfahren ZZM und GZM bringen vergleichbare Miner-Summen. Das Mischgut aus dem Labormischverfahren SRM weist mit einer Miner-Summe in Höhe von 2,6 den schlechtesten Wert auf. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die in einem kraftgeregelten Ermüdungsversuch resultierenden Dehnungen Auswirkungen auf die Miner-Summe haben und vom jeweiligen Versuchstyp beeinflusst werden.

Eine Änderung des gewählten Straßenaufbaus durch Wahl einer anderen Bauweise gemäß RStO 12 führt zu vergleichbaren Ergebnissen (vgl. Abbildung 4-43)

**Tabelle 4-36: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz)**

Belastungs- klasse [-]	Zugabeanteil AG [M.-%]	RDO	MA	Miner-Summe [-]			
				in situ	ZZM	GZM	SRM
Bk100	0	1,17	-	-	0,65	0,86	0,78
	40	-	-	-	1,28	1,23	1,72
	50	-	0,89	0,87	1,02	0,81	0,99
	60	-	-	-	0,62	0,86	0,85
Bk32	0	0,36	-	-	0,19	0,23	0,22
	40	-	-	-	0,33	0,31	0,42
	50	-	0,27	0,27	0,31	0,24	0,28
	60	-	-	-	0,18	0,23	0,24
Bk10	0	0,26	-	-	0,13	0,15	0,15
	40	-	-	-	0,21	0,19	0,25
	50	-	0,20	0,21	0,23	0,17	0,18
	60	-	-	-	0,12	0,15	0,16
Bk3,2	0	0,40	-	-	0,18	0,21	0,21
	40	-	-	-	0,28	0,25	0,33
	50	-	0,28	0,31	0,34	0,24	0,26
	60	-	-	-	0,17	0,21	0,23

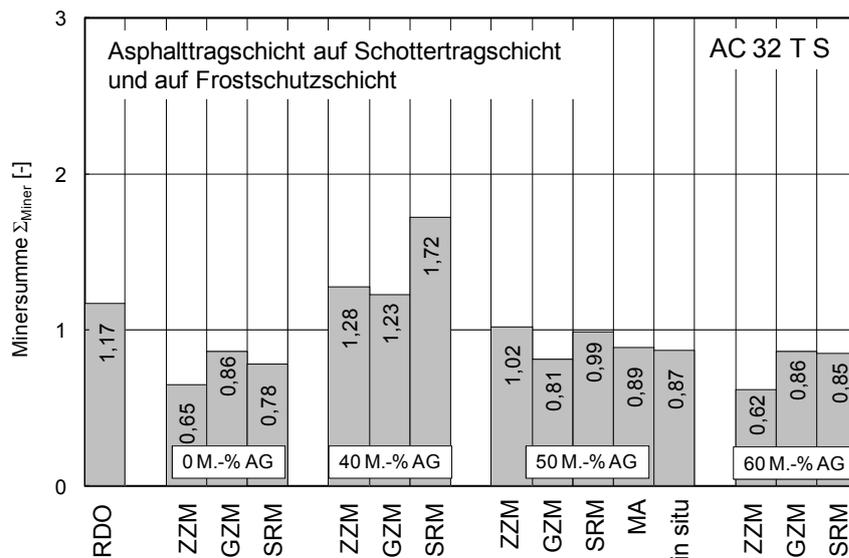


Abbildung 4-43. Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T S für die Bauweise Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschuttschicht, Belastungsklasse Bk100 (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz).

b) Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N)

In Tabelle 4-37 und Tabelle 4-38 sind die Berechnungsergebnisse in Form der „Miner-Summe“ für die Mischgut-Varianten 2 (AC 32 T N) wiedergegeben (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz).

Tabelle 4-37: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T N für die Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz)

Belastungs- klasse [-]	Zugabeanteil AG [M.-%]	Miner-Summe [-]				
		RDO	MA	in situ	GZM - warm	GZM - kalt
Bk100	0	1,44	-	-	< 10	-
	20	-	-	-	< 10	< 10
	30	-	< 10	< 10	< 10	6,58
	40	-	-	-	< 10	8,11
Bk32	0	0,40	-	-	2,20	-
	20	-	-	-	4,32	4,40
	30	-	2,83	3,88	3,50	1,74
	40	-	-	-	2,02	1,95
Bk10	0	0,27	-	-	0,97	-
	20	-	-	-	1,75	1,76
	30	-	1,13	1,86	1,96	1,12
	40	-	-	-	0,90	1,13
Bk3,2	0	0,73	-	-	1,73	-
	20	-	-	-	2,90	2,90
	30	-	1,87	3,65	4,57	3,09
	40	-	-	-	1,66	2,80

**Tabelle 4-38: Berechnungsergebnisse aus der rechnerischen Dimensionierung gem. RDO Asphalt 09 für die Mischgut-Varianten AC 32 T N für die Bauweise Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschuttschicht (RDO-Kalibrierasphalt als Referenz)**

Belastungs- klasse [-]	Zugabeanteil AG [M.-%]	Miner-Summe [-]				
		RDO	MA	in situ	GZM - warm	GZM - kalt
Bk100	0	1,17	-	-	6,42	-
	20	-	-	-	< 10	< 10
	30	-	8,22	< 10	< 10	5,08
	40	-	-	-	5,89	5,68
Bk32	0	0,36	-	-	1,29	-
	20	-	-	-	2,33	2,34
	30	-	1,51	2,49	2,62	1,50
	40	-	-	-	1,20	1,50
Bk10	0	0,26	-	-	0,61	-
	20	-	-	-	1,00	1,00
	30	-	0,65	1,29	1,62	1,09
	40	-	-	-	0,58	0,97
Bk3,2	0	0,40	-	-	0,76	-
	20	-	-	-	1,23	1,22
	30	-	0,79	1,70	2,33	1,73
	40	-	-	-	0,74	1,47

## 5 Interpretation der Untersuchungsergebnisse

Anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Ergebnisse werden im Folgenden die Auswirkungen der Labormischverfahren und des Zugabeanteils von Asphaltgranulat auf die gebrauchungsverhaltenorientierten Asphalteeigenschaften interpretiert. Im Einzelnen sind die Ergebnisse aus den Zug- und Abkühlversuchen (Kapitel 3.4.2), dem dynamischen Stempelindringversuch (Kapitel 3.4.1) und aus den Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen zusammen mit den Resultaten aus der rechnerischen Dimensionierung (Kapitel 4.3) in die Beurteilung einbezogen. Die Ergebnisinterpretation zielt auf eine Beurteilung der Einflüsse des Labormischverfahrens und des Zugabeanteils von Asphaltgranulat auf die resultierenden mechanischen Asphalteeigenschaften ab.

### 5.1 Kälteverhalten

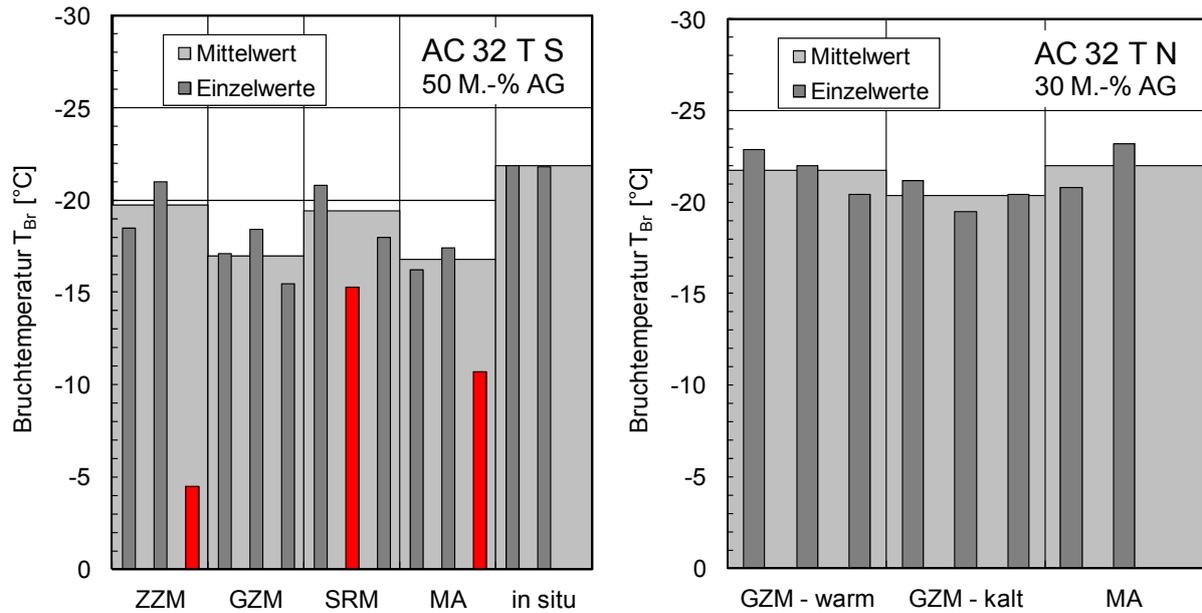
Die Beurteilung des Widerstandes gegen Kälterissbildung der Asphaltmischgut-Varianten erfolgt anhand der Kennwerte:

- Bruchtemperatur  $T_{Br}$  im Abkühlversuch und
- Zugfestigkeitsreserve  $\Delta\beta_z(T)$  bei einer Vergleichstemperatur von  $T = 0 \text{ °C}$ .

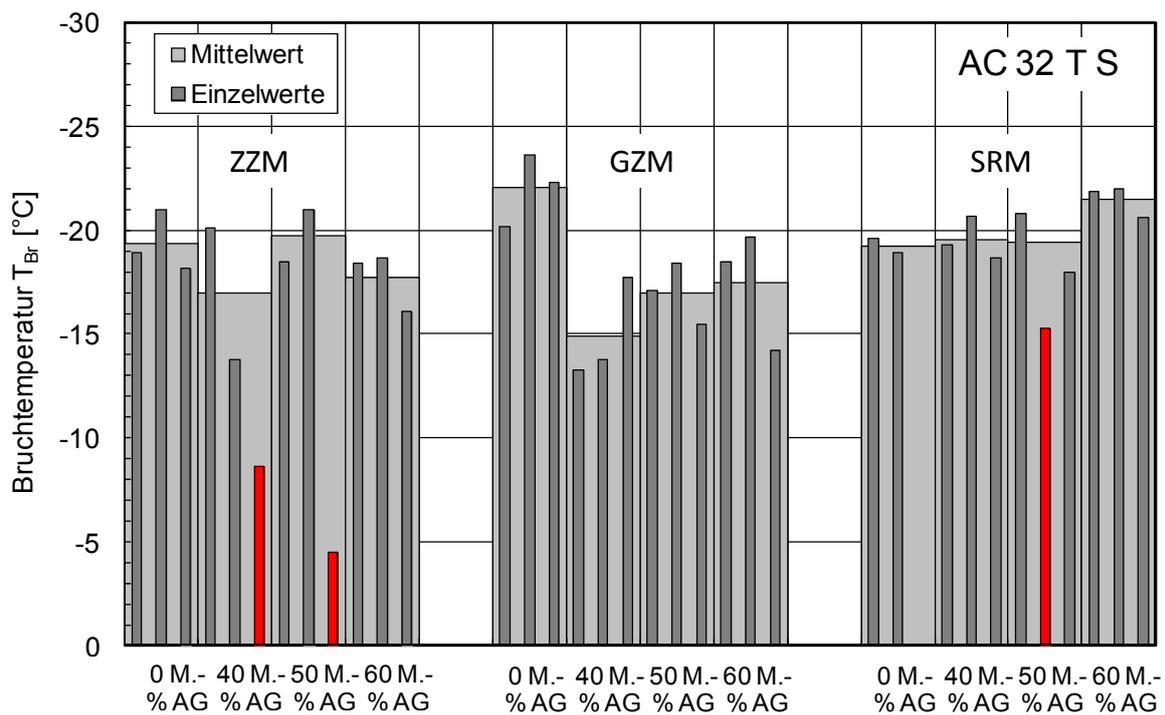
In den nachfolgenden Abbildungen sind die für die verschiedenen AC 32 T S und AC 32 T N Mischgut-Varianten (mit einem Zugabeanteil von 50 M.-% bzw. 30 M.-% Asphaltgranulat) gemessenen Einzelwerte sowie die Mittelwerte gegenübergestellt (statistische Ausreißer sind rot dargestellt).

Es zeigen sich deutliche Unterschiede in den Bruchtemperaturen für jede Mischgut-Variante. Während die Ergebnisse für die Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) mit 30 M.-% Asphaltgranulat nur gering schwanken, ergeben sich bei der Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) mit 50 M.-% Asphaltgranulat bezüglich der Bruchtemperaturen Unterschiede von bis zu 4,1 K (vgl. Abbildung 5-1, links).

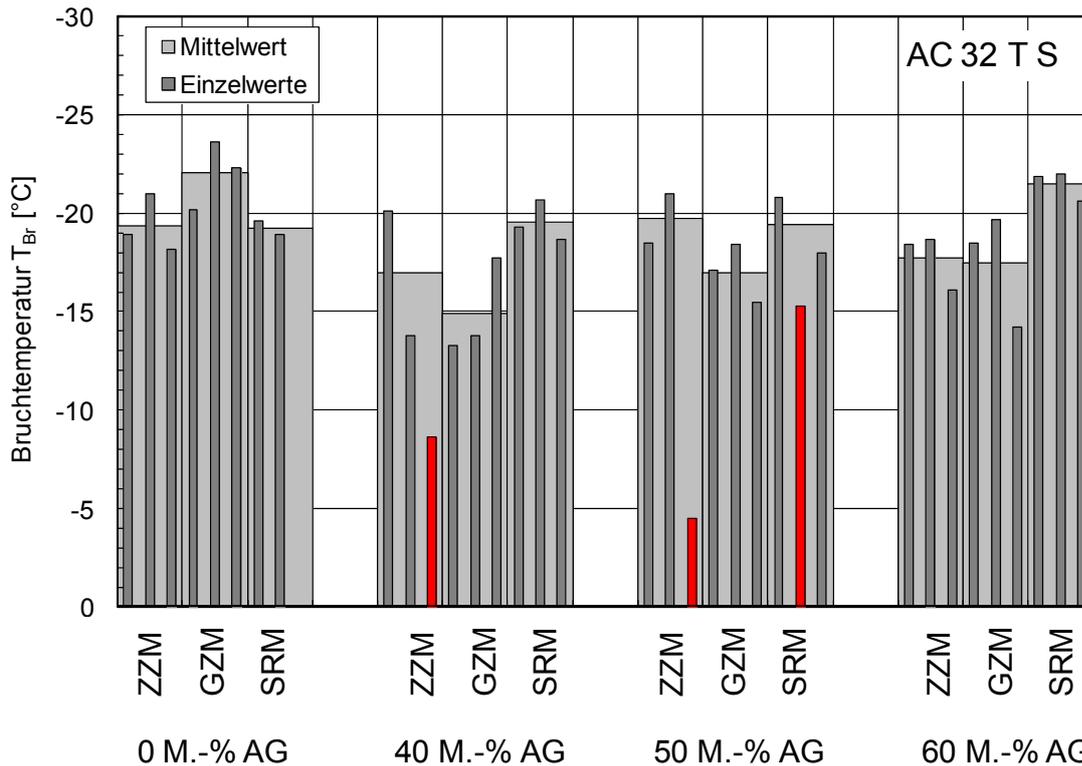
In Abbildung 5-2 sind die Bruchtemperaturen für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und des Labormischverfahrens dargestellt. Der Einfluss des Zugabeanteils auf die Bruchtemperatur ist nicht systematisch. Offensichtlich wird die Bruchtemperatur nicht von den im Rahmen dieser Untersuchungen variierten Labormischverfahren einheitlich reproduzierbar beeinflusst.



**Abbildung 5-1. Bruchtemperaturen für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S mit 50 M.-% Asphaltgranulat; links) und für die Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N mit 30 M.-% Asphaltgranulat; rechts).**



**Abbildung 5-2. Bruchtemperaturen für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates und des Labormischverfahrens.**



**Abbildung 5-3. Bruchtemperaturen für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) in Bezug auf das Labormischverfahren bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates.**

Die Zugfestigkeitsreserve wird zusammenfassend für eine Vergleichstemperatur von  $T = 0 \text{ °C}$  analysiert, da bei dieser Temperatur sowohl für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) als auch für die Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) die gleiche Reihung der Zugfestigkeitsreserve zu beobachten ist. In Abbildung 5-4 sind die Zugfestigkeitsreserven der Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S), in Abbildung 5-5 jene der Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) gegenübergestellt.

Tendenziell erzielen die mittels ZYM hergestellten Asphalttragschicht-Varianten höhere Zugfestigkeitsreserven als jene mittels GYM hergestellten. Die SRM-Variante zeigt bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat tendenziell höhere Zugfestigkeitsreserven im Vergleich zu den anderen Labormischverfahren. Offensichtlich wird die Zugfestigkeitsreserve nicht von den im Rahmen dieser Untersuchungen variierten Labormischverfahren einheitlich reproduzierbar beeinflusst.

Bei der Bezugstemperatur von  $0 \text{ °C}$  ist festzustellen, dass das Zugabeverfahren (Warm- bzw. Kaltzugabe) die resultierenden Zugfestigkeitsreserven nur geringfügig beeinflusst. Ein Zugabeanteil von 30 M.-% Asphaltgranulat führt im Vergleich zu den anderen Zugabeanteilen zu den höchsten Zugfestigkeitsreserven. Es ist kein einheitlicher Zusammenhang zwischen Zugabeverfahren und Zugfestigkeitsreserve ableitbar.

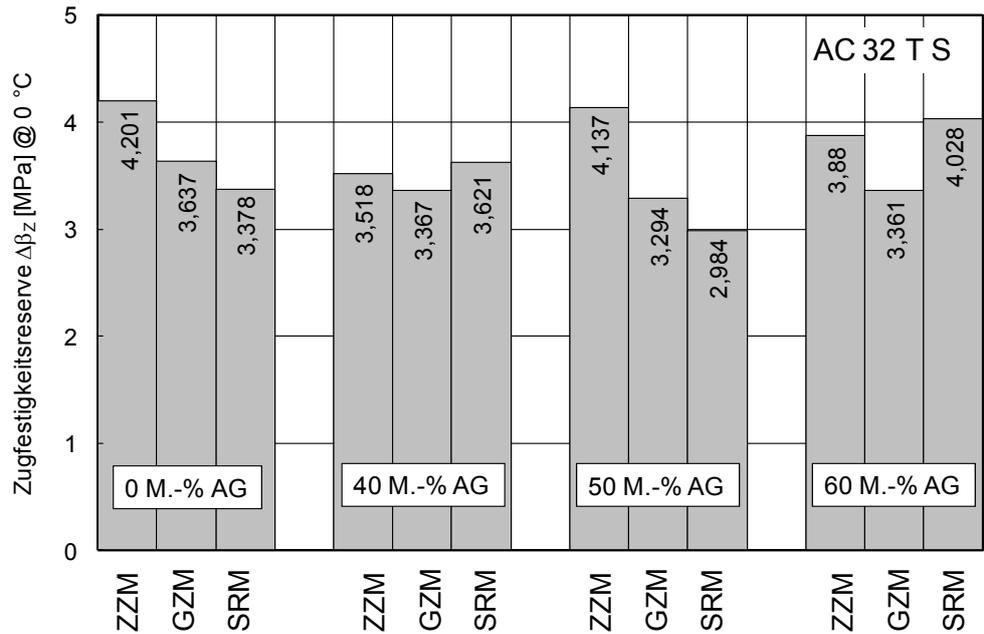


Abbildung 5-4. Zugfestigkeitsreserven bei 0 °C für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) für unterschiedliche Labormischverfahren und bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates.

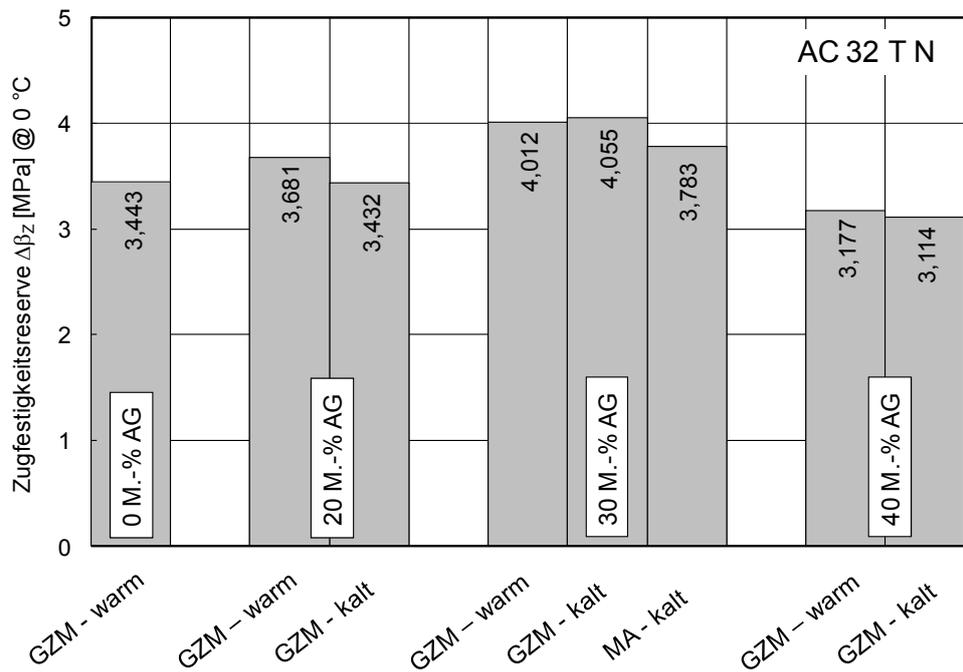
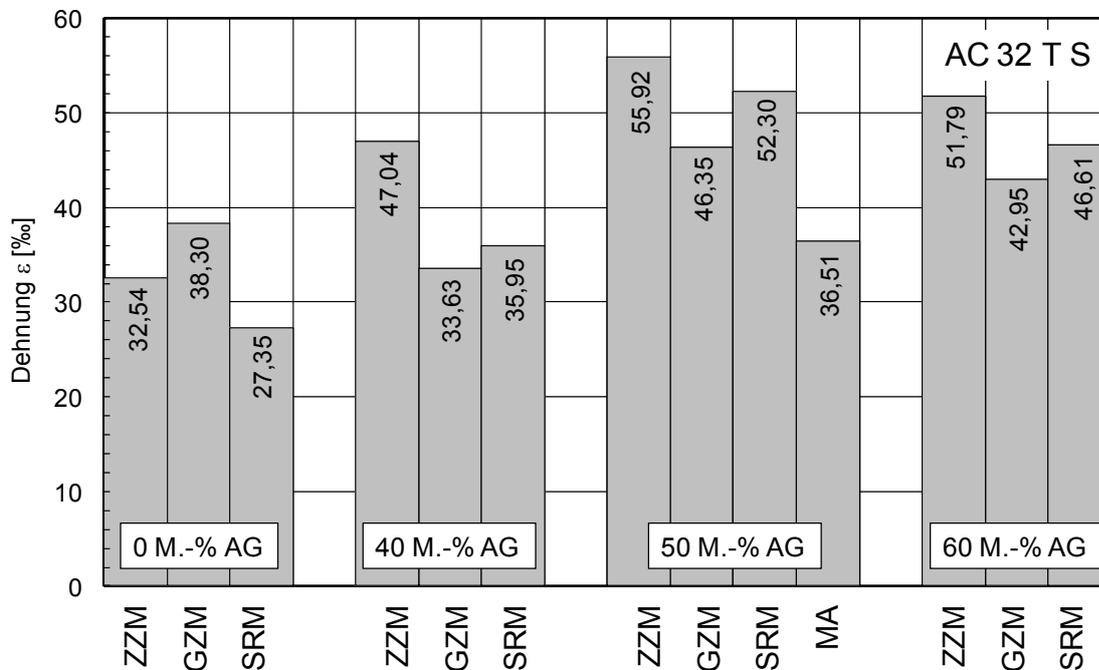


Abbildung 5-5. Zugfestigkeitsreserven bei 0 °C für die Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) für unterschiedliche Zugabeverfahren und bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates.

## 5.2 Verformungsverhalten

Abbildung 5-6 zeigt die Ergebnisse der akkumulierten bleibenden Dehnungen der Mischgut-Varianten AC 32 T S aus dem Dynamischen Stempelindringversuch, Abbildung 5-7 jene der Mischgut-Varianten AC 32 T N.



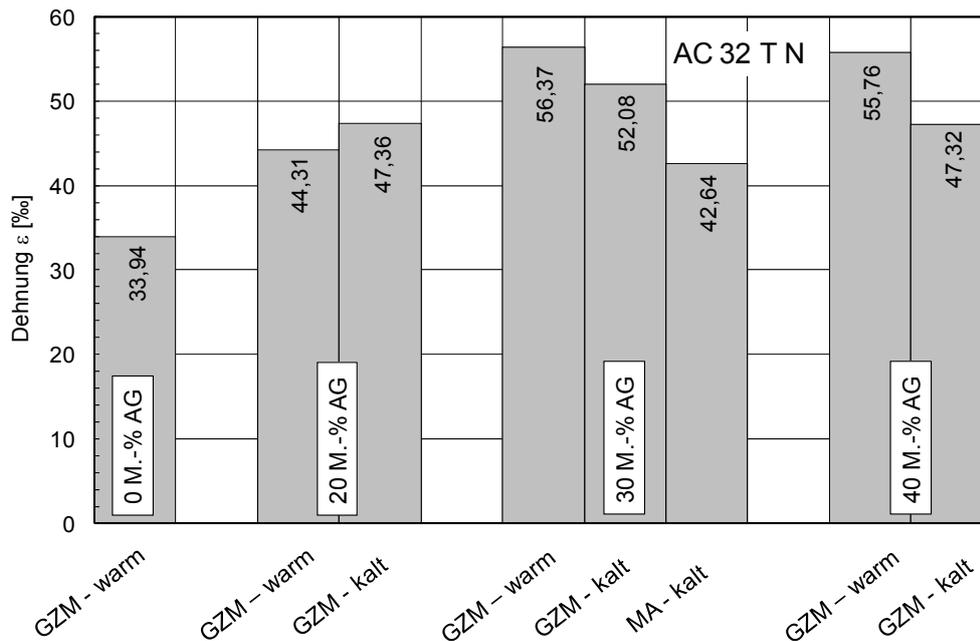
**Abbildung 5-6. Akkumulierte bleibende Dehnungen aus dem dynamischen Stempelindringversuch für die Mischgut-Varianten AC 32 T S in Bezug auf das Labormischverfahren bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates.**

Aus Abbildung 5-6 ist kein systematischer Einfluss der Labormischverfahren auf die Verformungsbeständigkeit ableitbar. Tendenziell ergeben sich geringere Verformungsbeständigkeiten bei Verwendung des ZZM.

Bei allen dargestellten Labormischverfahren ist ein Einfluss des Zugabeanteils von Asphaltgranulat auf die Verformungseigenschaften erkennbar. Es kann eine einheitliche Reihung hinsichtlich vorteilhafter Verformungsbeständigkeit abgeleitet werden (Ausnahme: Asphalttragschicht-Variante 0 M.-% AG mittels GZM). So werden die besten Verformungseigenschaften ohne Zugabe von Asphaltgranulat erzielt, gefolgt von einem Zugabeanteil von 40 M.-%. Eine Erhöhung von 40 auf 60 M.-% Asphaltgranulat führt zu einer geringfügig schlechteren Verformungsbeständigkeit. Ein Zugabeanteil von 50 M.-AG führt zu den schlechtesten Verformungseigenschaften.

Das Zugabeverfahren zeigt keinen einheitlich reproduzierbaren Zusammenhang hinsichtlich der Verformungseigenschaften.

In Analogie zur Asphaltmischgut-Variante 1 (AC 32 T S) zeigt die Variante GZM-warm ohne Asphaltgranulat die besten Verformungseigenschaften (vgl. Abbildung 5-7).



**Abbildung 5-7. Akkumulierte bleibende Dehnungen aus dem dynamischen Stempelindringversuch für die Mischgut-Varianten AC 32 T N in Bezug auf das Zugabeverfahren bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates.**

### 5.3 Ermüdungsverhalten

In Abbildung 5-8 sind die im Zug-Schwellversuch bei +20 °C ermittelten Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  der Mischgut-Varianten AC 32 T S dargestellt, in Abbildung 5-9 jene der Mischgut-Varianten AC 32 T N.

Aus Abbildung 5-8 kann abgeleitet werden, dass der Zugabeanteil des Asphaltgranulates beeinflusst die Ermüdungsbeständigkeit. Verbesserte Ermüdungseigenschaften zeichnen sich bei einer Zugabe von 50 M.-% Asphaltgranulat und einer gewählten Oberspannung  $\sigma_o$  von 0,6 MPa für alle Labormischverfahren ab (vgl. Abbildung 5-8, oben). Durch das Heraufsetzen der Oberspannung von  $\sigma_o = 0,6$  MPa auf  $\sigma_o = 0,8$  MPa werden bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat die höchsten Lastwechselzahlen erreicht (vgl. Abbildung 5-8, unten). Auffällig ist der Zusammenhang zwischen dem Zugabeanteil von Asphaltgranulat und den ermittelten Lastwechselzahlen bei den Mischgut-Varianten aus den Labormischverfahren GZM und SRM. Das Labormischverfahren zeigt einen einheitlich reproduzierbaren Zusammenhang hinsichtlich der Ermüdungseigenschaften. Der Zugabeanteil an Asphaltgranulat bei unterschiedlichen Oberspannungen führt nicht zu einer einheitlich reproduzierbaren Zuordnung.

Aus Abbildung 5-9 kann abgeleitet werden, dass ein hoher Zugabeanteil von Asphaltgranulat bei der Warmzugabe in höheren Lastwechselzahlen resultiert. Bei der Kaltzugabe werden mit einem Zugabeanteil von 30 M.-% Asphaltgranulat bei einer gewählten Oberspannung von 0,4 MPa die höchsten Lastwechselzahlen erzielt. Das Zugabeverfahren zeigt keinen einheitlich reproduzierbaren Zusammenhang hinsicht-

lich der resultierenden Ermüdungseigenschaften. Tendenziell resultiert eine Erhöhung des Zugabeanteils an Asphaltgranulat in steigenden Lastwechselzahlen. Im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat werden vergleichbare Lastwechselzahlen erst ab einem Zugabeanteil von 30 M.-% AG erreicht. Bei der Mischgut-Variante MA werden im Vergleich zu den im Labor hergestellten Mischgut-Varianten bei gleichem Zugabeanteil an Asphaltgranulat geringere ertragbare Lastwechselzahlen erhalten.

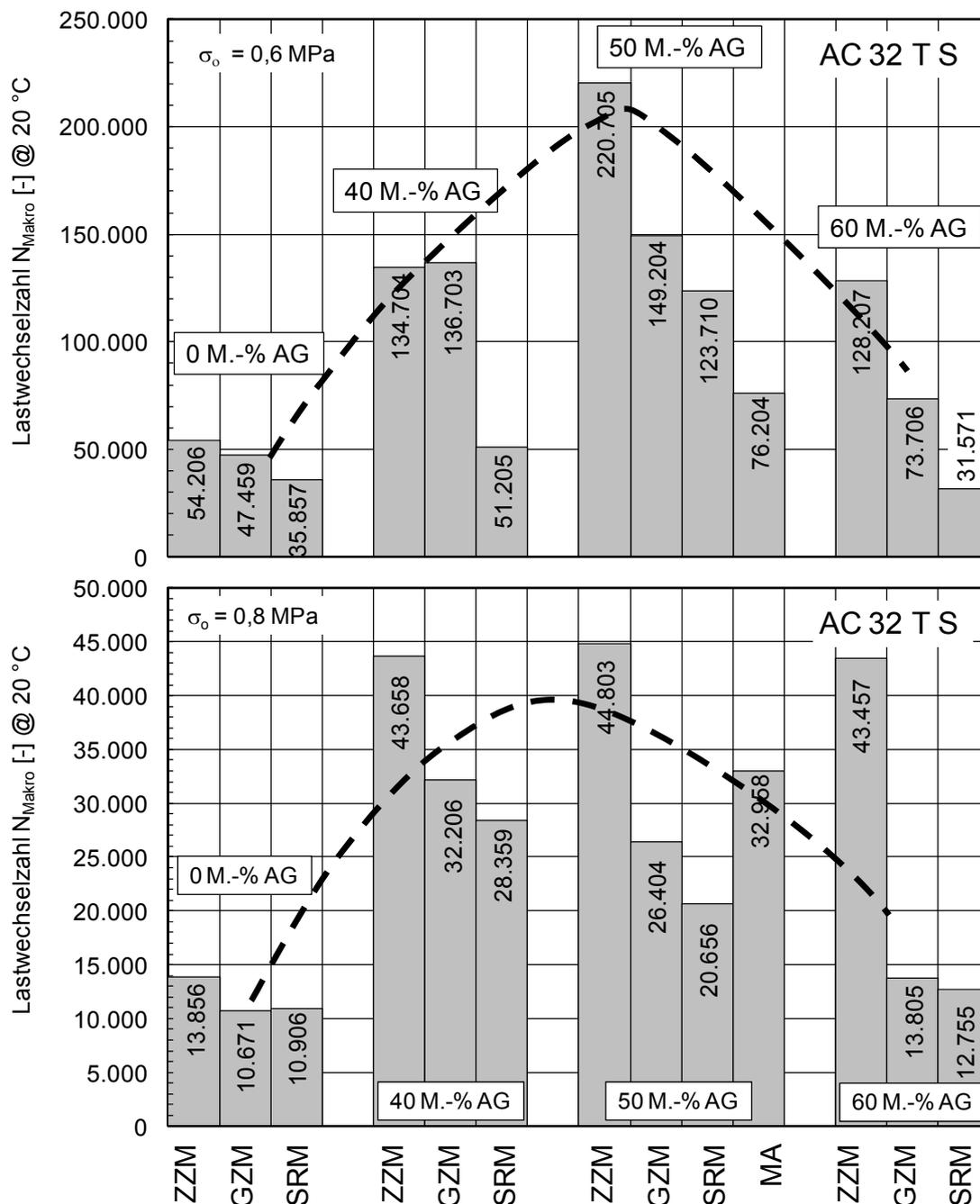


Abbildung 5-8. Zug-Schwellversuch bei +20 °C und bei den Oberspannungen  $\sigma_0$  von 0,6 MPa (oben) und 0,8 MPa (unten): Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  für die Mischgut-Varianten AC 32 T S.

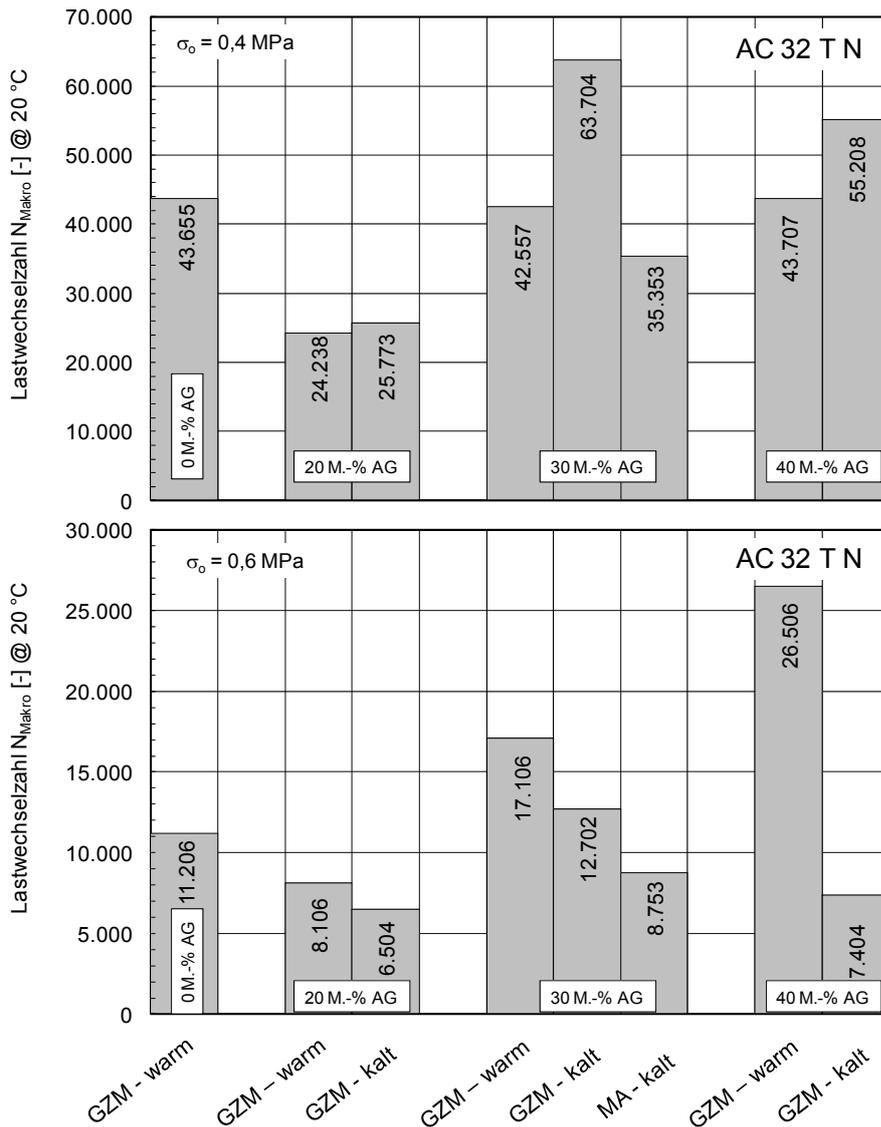
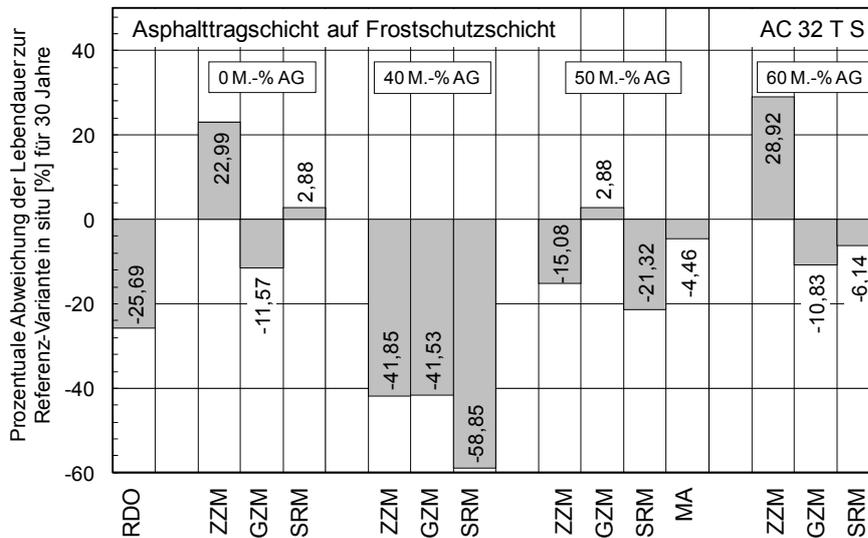


Abbildung 5-9. Zug-Schwellversuch bei  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  und bei den Oberspannungen  $\sigma_0$  von  $0,4 \text{ MPa}$  (oben) und  $0,6 \text{ MPa}$  (unten): Lastwechselzahlen  $N_{\text{Makro}}$  für die Mischgut-Varianten AC 32 T N.

#### 5.4 Rechnerische Dimensionierung

In Abbildung 5-10 ist zusammenfassend für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) mit der Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht die prozentuale Abweichung der rechnerischen Lebensdauer zur Referenz-Variante „in situ“ dargestellt. Bei einem Zugabeanteil an Asphaltgranulat von  $50 \text{ M.-%}$  resultiert für das mit dem GZM hergestellte Mischgut eine geringfügig höhere Lebensdauer von  $+2,88 \text{ } \%$  gegenüber der Referenz-Variante „in situ“. Die großtechnisch hergestellte Mischgut-Variante MA zeigt eine Abweichung von  $-4,46 \text{ } \%$ . Eine Reduktion des Zugabeanteils von Asphaltgranulat auf  $40 \text{ M.-%}$  resultiert in einer für alle Labormischverfahren einheitlichen Reduktion der Lebensdauer. Hier erzielen die Labormischverfahren ZZM und GZM vergleichbare Ergebnisse von ca.  $-41 \text{ } \%$ . Das Labormischverfahren SRM führt zu ei-

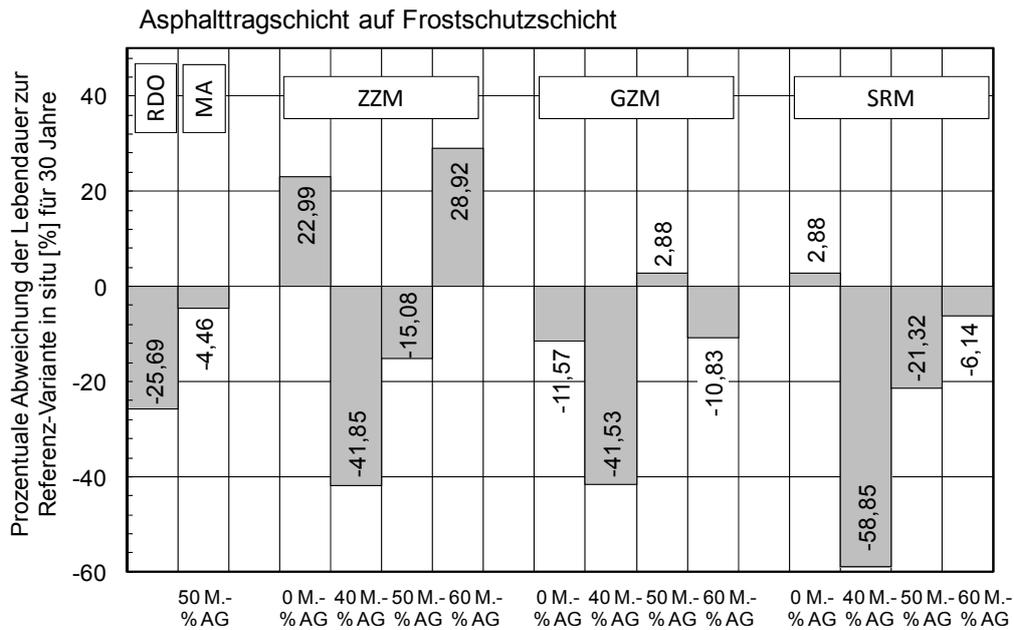
ner Reduktion der rechnerischen Lebensdauer um 58,85 %. Auffällig ist die vergleichsweise geringe rechnerische Lebensdauer für den RDO Kalibrierasphalt.



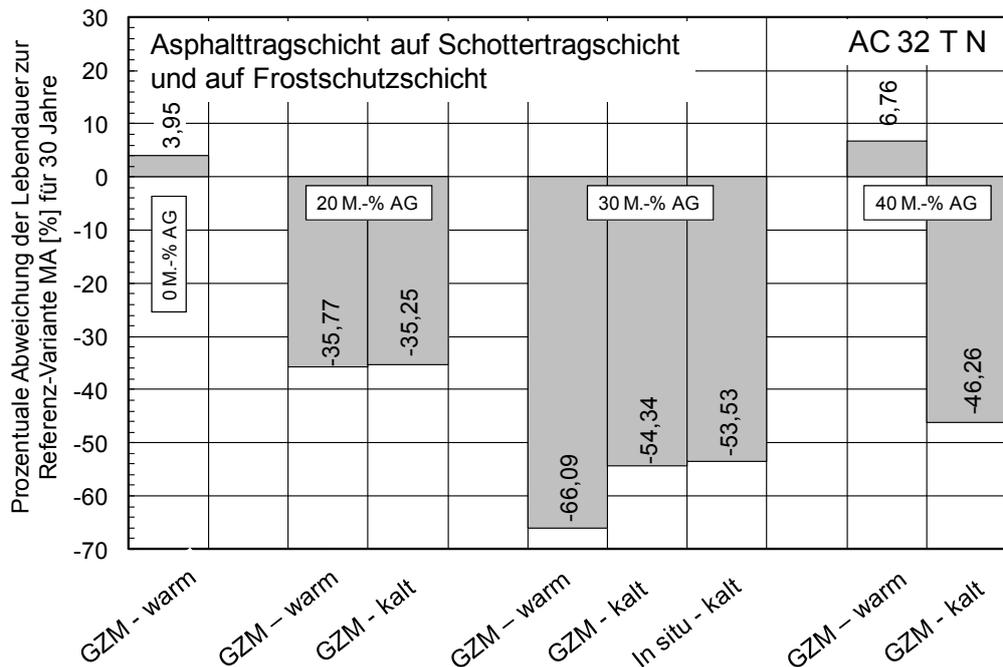
**Abbildung 5-10. Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) für die Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht: Prozentuale Abweichung der Lebensdauer zur Referenz-Variante „in situ“.**

In Abbildung 5-11 sind die Ergebnisse für untersuchten Labormischverfahren bei variierenden Zugabeanteilen von Asphaltgranulat gegenübergestellt. Für die Mischgut-Varianten der Labormischverfahren ZMZ und SRM führt eine Erhöhung des Zugabeanteils von 40 auf bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat zu höheren rechnerischen Lebensdauern. Das Mischgut aus dem Labormischverfahren GZM zeigt hinsichtlich des Zugabeanteils die höchste rechnerische Lebensdauer bei einer Zugabe von 50 M.-%. Sowohl das Labormischverfahren als auch der Zugabeanteil an Asphaltgranulat zeigen keinen einheitlich reproduzierbaren Zusammenhang hinsichtlich der Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung.

In Abbildung 5-12 ist zusammenfassend für die Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) mit der Bauweise Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschuttschicht am Beispiel der Belastungsklasse Bk3,2 die prozentuale Abweichung der rechnerischen Lebensdauer zur Referenz-Variante MA dargestellt. Für einen Zugabeanteil an Asphaltgranulat von 20 M.-% wird kein Einfluss des Zugabeverfahrens auf die rechnerische Lebensdauer festgestellt. Eine Erhöhung des Zugabeanteils an Asphaltgranulat auf 30 M.-% führt zu einer weiteren Reduktion der rechnerischen Lebensdauer um 66 % bei Warm- und 54 % bei Kaltzugabe. Bei einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat zeigt die Warmzugabe eine um 6,7 % erhöhte rechnerische Lebensdauer im Vergleich zur Referenz-Variante MA. Insgesamt zeigt das Zugabeverfahren keinen einheitlich reproduzierbaren Zusammenhang hinsichtlich der Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung.



**Abbildung 5-11. Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) für die Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht: Prozentuale Abweichung der Lebensdauer zur Referenz-Variante „in situ“ in Bezug auf das Labormischverfahren bei Variation des Zugabeanteils des Asphaltgranulates.**



**Abbildung 5-12. Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) für die Bauweise Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und auf Frostschutzschicht; Belastungsklasse Bk3,2: prozentuale Abweichung der Lebensdauer zur Referenz-Variante MA.**

## **6 Laborverfahren zur Herstellung von Asphalt-Probekörpern für Performance-Prüfungen unter Verwendung von Asphaltgranulat**

Aus den im Rahmen dieses Projekts gesammelten und aus den am ISBS bestehenden Erfahrungen zu Herstellung und Verarbeitung von mit Asphaltgranulat modifiziertem Asphaltmischgut im Labor werden zusammenfassend folgende Empfehlungen zu Mischgutherstellung und Produktion von Asphaltprobekörpern für Performance-Prüfungen gegeben.

### **6.1 Mischgutherstellung im Labor**

Um eine bestmögliche Homogenität des im Labor hergestellten Asphaltmischgutes zu gewährleisten, hat sich nachfolgend erläuterte Vorgehensweise zur Asphaltmischgutherstellung unter Verwendung von Asphaltgranulat im Labor bewährt:

- Wahl der Mischtemperatur,
- Wahl der Temperatur der frischen Gesteinskörnung zur Gewährleistung der Mischtemperatur bei Zugabe von Asphaltgranulat,
- Ablauf der Mischgutherstellung.

#### **6.1.1 Wahl der Mischtemperatur**

Die Mischtemperatur des Asphaltmischgutes wird in Abhängigkeit von der vorgesehenen Bindemittelart und -sorte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 35 „Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium“ (FGSV, 2007b) gewählt. Dabei sind Minimalanforderungen an die Mischtemperatur, die der Referenztemperatur gemäß Tabelle 6-1 entspricht, zu beachten.

Beim Mischen von Walzasphalt darf die Maximaltemperatur die Referenztemperatur höchstens um 20 K überschreiten. Dies dient als Vorhaltemaß für das Abkühlen während des Mischens und der Probeteilung.

Bei der Herstellung von Gussasphalt darf die Mischtemperatur die Referenztemperatur gemäß Tabelle 6-1 bei Verwendung von Asphaltgranulat aus Gussasphalt nicht überschreiten.

Tabelle 6-1: Referenztemperatur in Abhängigkeit der Bindemittelart und -sorte (FGSV, 2007b)

Bitumensorte nach der DIN EN 12591	Referenztemperatur [°C]	
	Walzasphalt	Gussasphalt
20/30	180	230
30/45	175	230
50/70	150	-
70/100	145	-
160/220	135	-

Polymermodifiziertes Bitumen nach der DIN EN 14023	Referenztemperatur [°C]	
	Walzasphalt	Gussasphalt
10/40-65	175	230
25/55-55	150	230
45/80-50	150	-
120/200-40	145	-
40/100-65	150	-

### 6.1.2 Wahl der Temperatur der frischen Gesteinskörnung zur Gewährleistung der Mischtemperatur bei Zugabe von Asphaltgranulat

#### (a) Kaltzugabe

Bei der Mitverwendung von Asphaltgranulat ist die optimale Temperatur der frischen, ungebrauchten Gesteinskörnungen in Anlehnung an Abbildung 6-1 zu wählen.

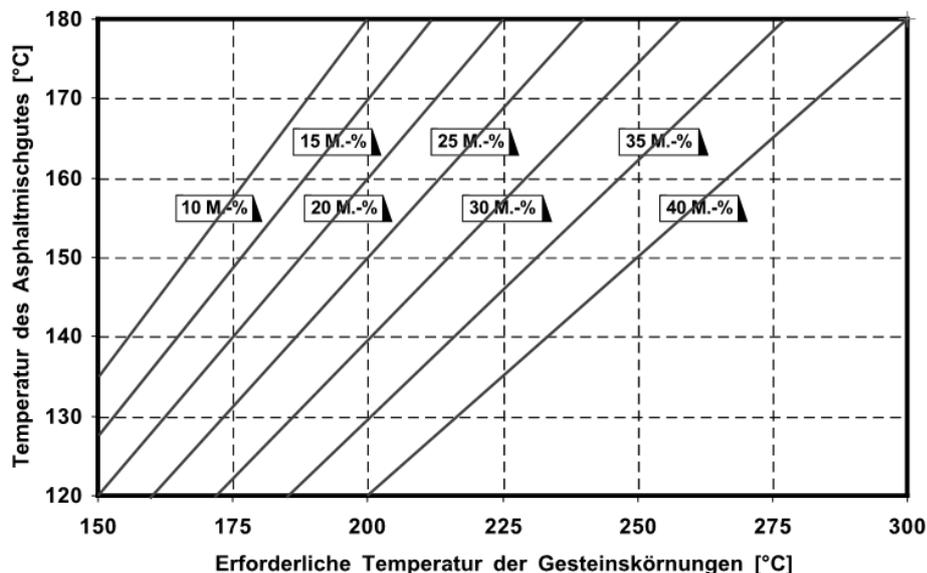


Abbildung 6-1. Erforderliche Temperatur der Gesteinskörnungen in °C bei Zugabe von Asphaltgranulat-Anteilen zwischen 10 und 40 M.% im trockenen Zustand (FGSV, 2009b).

Höhere Zugabeanteile an Asphaltgranulat (als in Abbildung 6-1 dargestellt) führen zu höheren erforderlichen Temperaturen der frischen Gesteinskörnungen. Eine Abschätzung hierfür kann näherungsweise durch Parallelverschieben des dargestellten Zugabeanteils an Asphaltgranulat von 40 M.-% erfolgen.

Die Temperatur der frischen Gesteinskörnungen wird bei der Kaltzugabe in Abhängigkeit des Zugabeanteils des Asphaltgranulats sowie dessen Wassergehalt, ent-

sprechend den Vorgaben des Merkblattes für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA) gemäß Tabelle 6-2 festgelegt. Hier werden zu beaufschlagende Korrekturbeträge für die Temperatur der frischen Gesteinskörnungen aufgeführt, die aus Abbildung 6-1 ermittelt wurden.

**Tabelle 6-2: Korrektur der Temperatur der Gesteinskörnungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Asphaltgranulates (kritischer Bereich grau hinterlegt)**

Anteil an Asphaltgranulat in M.-%	Wassergehalt des Asphaltgranulates in M.-%					
	1	2	3	4	5	6
	Temperaturkorrektur in °C					
10	4	8	12	16	20	24
15	6	12	18	24	30	36
20	8	16	24	32	40	48
25	10	20	30	40	50	60
30	12	24	-	-	-	-
35	14	28	-	-	-	-
40	16	32	-	-	-	-

Am Beispiel einer Asphaltmischgut-Variante AC 32 T N, die im Rahmen des Forschungsprojekts im Labor hergestellt wurde, wird das Vorgehen zur Temperaturermittlung der frischen Gesteinskörnungen nachfolgend im Detail erläutert.

Das Zielbindemittel der Asphalttragschichtmischgut-Variante AC 32 T N ist ein Straßenbaubitumen 50/70, daraus folgt gemäß Tabelle 6-1 eine Referenztemperatur des Asphaltmischgutes von 150 °C, welche um nicht mehr als 20 K überschritten werden darf. Gewählt wird eine Mischtemperatur von 160 °C.

Aus Abbildung 6-1 kann die Temperatur der frischen Gesteinskörnungen in Abhängigkeit des Zugabeanteils des Asphaltgranulats bei der Kaltzugabe ermittelt werden. So resultiert bei Einsatz von 20 M.-% trockenem Asphaltgranulat und einer definierten Mischtemperatur von 160 °C eine erforderliche Temperatur der frischen Gesteinskörnungen von 200 °C. Bei einem Wassergehalt des Asphaltgranulates von beispielsweise 3 M.-% muss zusätzlich eine Korrektur der Temperatur in Höhe von 24 °C erfolgen (vgl. Tabelle 6-3 (links)).

Hinweis: Handelsübliche Wärmekammern mit Luftumwälzung nach DIN 500011-12 weisen im Regelfall eine technische Höchsttemperatur von 300 °C auf. Dies kann dazu führen, dass bei hohen Zugabeanteilen an Asphaltgranulat eine erforderliche Temperatur der frischen Gesteinskörnungen größer 300 °C zum Erreichen der Mischtemperatur nicht erzielt werden kann.

#### (b) Warmzugabe

Um die Erwärmung von Asphaltgranulat in der Paralleltrommel der Asphaltmischanlage zu simulieren, wird im Labor bei Warmzugabe das Asphaltgranulat über eine

Zeitdauer von vier Stunden auf eine Temperatur von  $T = 130\text{ °C}$  erwärmt. Dies geschieht in Anlehnung an das Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA) (FGSV, 2009b), in dem im Abschnitt „Erwärmung von Asphaltgranulat in besonderer Vorrichtung“ die Temperatur des Asphaltgranulats in der Mischanlage von  $130\text{ °C}$  definiert ist. Die Zeitdauer von 4 Stunden ist in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 35 gewählt.

Die Temperatur der frischen Gesteinskörnungen wird in Abhängigkeit des Zugabeanteils an Asphaltgranulat bestimmt, siehe Beispiel für Asphalttragschicht-Mischgut AC 32 T N in Tabelle 6-3.

**Tabelle 6-3: Temperaturen für die frischen Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von Zugabeanteil und Zugabeart von Asphaltgranulat AG für eine Asphalttragschicht-Mischgut AC 32 T N**

Anteil AG	$T_{\text{Gestein}} [\text{°C}]$	
	Kaltzugabe AG 3 M.-% $\text{H}_2\text{O}$ @ $20\text{ °C}$	Warmzugabe AG 0 M.-% $\text{H}_2\text{O}$ @ $130\text{ °C}$
20 M.-%	224 (200+24)	Gewählt 170

### 6.1.3 Ablauf bei der Mischgutherstellung

Die Asphaltmischgutherstellung im Labor umfasst das Bereitstellen und Einwiegen der Gesteinskörnungen und des Bitumens, die Einwaage sowie das Mischen der Baustoffkomponenten.

#### (a) Einwaage der Gesteinskörnungen

Zunächst werden die Gesteinskörnungen (hier am Beispiel eines AC 32 dargestellt), mit der größten Kornklasse beginnend, in folgender Reihenfolge eingewogen und anschließend erwärmt:

- Körnung 22/32,
- Körnung 11/22,
- Körnung 8/11,
- Körnung 5/8,
- Natursand bzw. Brechsand,
- Gesteine der Körnung 2/5.
- Der Füller wird separat eingewogen.

Anschließend werden das Bitumen und das eingewogene Asphaltgranulat bereitgestellt.

#### (b) Temperierung des Gesteins in Abhängigkeit vom Zugabeverfahren des Asphaltgranulats und Temperatur des Bitumens

Die frischen Gesteinskörnungen und der Füller sind in Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 35 (FGSV, 2007b) für eine Zeitdauer von mindestens 8 Stunden in einer belüfteten Wärmekammer zu temperieren. Das Bitu-

men wird für eine Zeitdauer von 4 Stunden auf die Mischtemperatur erhitzt, wobei eine Abweichung von  $\pm 5$  K tolerierbar ist.

#### (c) Mischgutherstellung im verschließbaren Labormischer

Die temperierten Mischgutkomponenten werden anschließend wie folgt mit dem verschließbaren Labormischer zu Asphaltmischgut vermengt:

- Einfüllen der heißen Gesteinskörnungen in den Labormischer,
- Zugabe des Füllers,
- Mischen für eine Dauer von 20 s,
- Einfüllen des Asphaltgranulates und Mischen bei Simulation der Kaltzugabe für eine Dauer von 30 s und bei Simulation der Warmzugabe für die Dauer von 15 s. Nach dem Einfüllen von Asphaltgranulat bei der Kaltzugabe ist mit der Entstehung von Wasserdampf zu rechnen. Aus diesem Grund sollte der Labormischer sofort nach dem Einfüllvorgang geschlossen werden. Ein Fülleraustrag aus dem Mischgut ist zu vermeiden (vgl. Abschnitt d);
- Zugabe des heißen, frischen Bitumens,
- Nachmischen von mindestens 180 s. Renken und Lobach (2005; 2006) untersuchten den Einfluss der Nachmischzeit auf die Performance-Eigenschaften von Asphalt. Hier stellte sich die Nachmischzeit als dominante Einflussgröße dar. Sowohl auf die Verformungs- als auch auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften wirken sich lange Nachmischzeiten positiv aus.

#### (d) Mischgutherstellung im nicht verschließbaren Labormischer bei Kaltzugabe

Das Vermischen von kaltem Asphaltgranulat mit heißer Gesteinskörnung führt zu einer abrupten Wasserdampfentwicklung, wenn das feuchte Asphaltgranulat mit seiner hohen spezifischen Oberfläche in das über 200 °C heiße Frischgestein eingerührt wird. Die Dampfentwicklung führt zu einem Fülleraustrag, der eine Abweichung im Füllergehalt im Vergleich zur ursprünglichen Rezeptur bedingen kann und darüber hinaus eine Verschmutzung durch den Fülleraustrag mit sich bringt (vgl. Abbildung 6-2).



**Abbildung 6-2. Fülleraustrag während des Mischprozesses aufgrund von Wasserdampfentwicklung.**

Aus diesem Grund wird bei Verwendung eines nicht verschleißbaren Labormischers empfohlen, das unter Abschnitt (c) beschriebene Vorgehen zur Mischgutherstellung wie folgt zu ändern:

- Einfüllen der heißen Gesteinskörnungen in den Labormischer,
- Mischen für eine Dauer von 20 s,
- Einfüllen des Asphaltgranulates und Mischen bei Simulation der Kaltzugabe für eine Dauer von 30 s,
- Zugabe des Füllers,
- Zugabe des heißen, frischen Bitumens,
- Nachmischen von mindestens 180 s.

## **6.2 Vorgehensweise zum Einstellen eines definierten Wassergehaltes des Asphaltgranulats bei der Kaltzugabe**

Bei Verwendung von Asphaltgranulat bei Kaltzugabe ist der Wassergehalt im Asphaltgranulat einzustellen. Dabei kann wie folgt vorgegangen werden:

- Abfüllen von 5 kg luftgetrocknetem Asphaltgranulat in Blecheimer (ohne Deckel) und Lagerung im Ofen bei 130 °C für eine Zeitdauer von 4 Stunden (in Anlehnung an Warmzugabeverfahren);
- Wassergehaltsbestimmung des Inhaltes (2 x 1,5 kg) gemäß TP Asphalt 2007, Teil 14 (Ofentrocknung), Restinhalt des Eimers wird mit Deckel verschlossen um Austausch mit Luftfeuchtigkeit auszuschließen;
- nach Kenntnis des Wassergehaltes im getrockneten Asphaltgranulat kann jene Wassermenge berechnet werden, die zum Erreichen des Zielwassergehaltes benötigt wird (bei 20 °C Raumtemperatur entspricht 1 ml Wasser 1g);
- Einfüllen der ermittelten Wassermenge je Blecheimer über Messzylinder und Pipette;
- Verschließen des Blecheimers und Homogenisieren durch Schwenken/Schütteln des Eimers;
- Lagerung für eine Zeitdauer von 24 Stunden und Wiederholung des Homogenisierungsvorganges;
- Wassergehaltsbestimmung und ggf. Wiederholung der obigen Schritte.

Nachteilig ist ein geringfügiger Füllerverlust des Asphaltgranulats, der durch Anhaftung an der Blecheimerwandung begründet ist (Abbildung 6-3).



**Abbildung 6-3. Füllerverlust durch Anhaftungen an der Eimerwandung.**

### **6.3 Herstellung von Asphalt-Probepplatten**

Zur Herstellung von Asphalt-Probepplatten hat sich auch für mit Asphaltgranulat modifiziertes Asphaltmischgut das Verdichtungsverfahren mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät bewährt. Dazu ist das Verdichtungsverfahren gemäß den Technischen Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 33 (FGSV, 2007a) ist ohne Einschränkungen anwendbar.

## **7 Zusammenfassung**

### **7.1 Projektziel und Untersuchungsmethodik**

Die Wiederverwendung von Recyclingbaustoffen in Straßen ist seit geraumer Zeit ein wesentliches Forschungsthema der deutschen Straßenforschung. Die Grundlagen zum wissenschaftlichen Nachweis der Wirkung von Ausbauasphalt in Form von Asphaltgranulat in Asphaltmischgut stützen sich zu einem großen Teil auf gebrauchsvorhaltensorientierte Laborprüfungen (Performance-Prüfungen).

Auch wenn die Ergebnisse aus Laborstudien anhand von Versuchsstrecken validiert werden, bleibt aber stets eine gewisse Unsicherheit in der Aussagekraft von Laborprüfungen bestehen, weil die Prüfbedingungen die reale Beanspruchungssituation nicht exakt widerspiegeln. So war bisher weitgehend ungeklärt, in welchem Ausmaß welche Einflussparameter bei der Laborherstellung des Asphaltmischguts mit Ausbauasphalt die resultierenden mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Es war nicht bekannt, welches Herstellungsverfahren vorzugsweise angewandt werden sollte.

Insbesondere seit der Einführung der RDO Asphalt im Jahr 2010 (Richtlinien zur rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht; FGSV, 2010) wird der Vergleichbarkeit von Labor und Praxis eine besondere Bedeutung beigemessen, weil bei der rechnerischen Dimensionierung und Beurteilung der Nutzungsdauer einer Asphaltbefestigung über die Ermüdungseigenschaften und die Steifigkeit der Asphalttragschicht direkt an die Laborergebnisse mit der zulässigen Zahl an Verkehrsüberrollungen gekoppelt wird. Damit ist ein besseres Grundlagenverständnis um die Einflüsse der Probekörperherstellung im Labor – insbesondere bei der Verwendung von Asphaltgranulat – auf die in Performance-Prüfungen festgestellten mechanischen Eigenschaften unverzichtbar geworden.

Ziel des Projekts war daher die Klärung der Frage, wie im Labor Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat möglichst praxisnah hergestellt und daraus Probekörper gewonnen werden können, die vergleichende mechanische Eigenschaften aufweisen, wie das gleiche unter Praxisbedingungen in situ hergestellte und eingebaute Asphaltmischgut. Es waren die Herstellungsmodalitäten unter Laborbedingungen zu präzisieren, um im Rahmen einer „erweiterten“ Erstprüfung auf Grundlage der RDO Asphalt die Nutzungsdauer der Asphaltkonstruktion bestmöglich prognostizieren zu können. Der Einfluss von möglichen Schwankungen in der Asphaltgranulatqualität war dabei zu berücksichtigen.

Zur Erreichung des Projektziels wurde der Labormischprozess von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat anhand von ausgewählten Asphaltvarianten untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Labormischverfahren bzw. -geräte eingesetzt:

- Zweiwellen-Zwangsmischer ZZM im Maßstab von 1:8 (Mischwerkzeug einer Chargenmischanlage und somit der Mischkinematik unter Praxisbedingungen nachempfunden),
- Schlag- und Rührmischer SRM (auch REGO-Mischer) und
- Gegenlauf-Zwangsmischer GZM (auch Freundl-Mischer).

In den Untersuchungen wurden zwei Asphalttragschicht-Varianten berücksichtigt, die sowohl im Labor als auch in der Asphaltmischanlage hergestellt und im Labor mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät verdichtet wurden:

- Asphaltbeton der Sorte AC 32 T S mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen bei Warmzugabe (Referenz 50 M.-%) und
- Asphaltbeton der Sorte AC 32 T N mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen bei Kaltzugabe (Referenz 30 M.-%).

Zusätzlich wurden die Einzelkomponenten der jeweiligen Mischgutvariante – frische Gesteinskörnung inklusive Füller, Asphaltgranulat und Frischbindemittel – an der Asphalt-Mischanlage beschafft und im Labor unter Variation des Labormischverfahrens nachgemischt. Desweiteren wurden der Zugabeanteil sowie die Zugabeart des Asphaltgranulats (Warmzugabe bzw. Kaltzugabe) variiert.

Vom in der Mischanlage hergestellten und in der Straße eingebauten Mischgut wurden Bohrkerne entnommen und diese in die Laborprüfungen zur Charakterisierung der asphaltmechanischen Eigenschaften einbezogen.

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Herstellungsmodalitäten (Labor, Mischanlage, Baustelle) wurden die hergestellten Asphalt-Probekörper umfangreichen Laborprüfungen unterzogen. Dabei wurden die Bitumeneigenschaften und die asphaltmechanischen Eigenschaften mittels gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfungen (Performance-Prüfungen zu Verformungs-, Kälte-, Ermüdungseigenschaften und Steifigkeit) charakterisiert.

Die an den im Labor hergestellten Proben ermittelten Ergebnisse wurden den Ergebnissen aus Proben gegenübergestellt, die einerseits im Labor aus in der Mischanlage hergestelltem Asphaltmischgut verdichtet wurden und andererseits aus der Straße in Form von Bohrkernproben entnommen wurden.

Schließlich wurde jenes Labormischverfahren herausgearbeitet, das hinsichtlich der resultierenden Gebrauchseigenschaften den größtmöglichen Praxisbezug aufwies und in Form einer Arbeitsanleitung dokumentiert.

## **7.2 Schlussfolgerungen und Empfehlungen**

Die Performance-Eigenschaften von Asphalt mit Asphaltgranulat werden durch das Herstellungsverfahren im Labor beeinflusst. Dies wird auch durch die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Performance-Prüfungen hinsichtlich Kälte-, Verformungs-, Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten bestätigt, die vergleichend sowohl an

Laborproben als auch an Mischgutproben aus der Asphaltmischanlage sowie an Bohrkernproben aus der Straße durchgeführt wurden.

Im Projektverlauf wurden für 2 Varianten an Asphalttragschichtmischgut mit Asphaltgranulat die Einflüsse aus unterschiedlichen Labormischverfahren (Zweiwellen-Zwangsmischer ZZM, Schlag-Rührmischer SRM, Gegenlauf-Zwangsmischer GZM) als auch aus dem Zugabeanteil von Asphaltgranulat von 0 bis 60 M.-% für die Mischgut-Variante 1 (AC 32 T S) und Mischgut-Variante 2 (AC 32 T N) im Warm- oder Kaltverfahren auf die resultierenden Performance-Eigenschaften analysiert. Anhand dieser Untersuchungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die vergleichenden Untersuchungen zum Kälteverhalten unter Auswertung der Bruchtemperaturen und der Zugfestigkeitsreserven sowie des Verformungsverhaltens unter Auswertung der akkumulierten bleibenden Dehnungen aus dem dynamischen Stempelindringversuch haben ergeben, dass
  - mit zunehmenden Zugabeanteil an Asphaltgranulat (von 0 bis 60 M.-%) die resultierenden Performance-Eigenschaften tendenziell zunehmend beeinflusst werden und somit die Findung der optimalen Rezeptur ein Optimierungsprozess ist,
  - die Wahl des Gerätetyps des Labormischers von untergeordneter Bedeutung ist und Zweiwellen-Zwangsmischer, Gegenlauf-Zwangsmischer und Schlag-Rührmischer diesbezüglich wahlweise eingesetzt werden können,
  - das untersuchte Zugabeverfahren (Warm- oder Kaltzugabe) das Kälteverhalten nicht signifikant beeinflusst.
- Die Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten unter Auswertung der erreichten Lastwechselzahlen im Zug-Schwellversuch bei einer Prüftemperatur von 20 °C haben ergeben, dass
  - unabhängig vom Labormischverfahren und des Zugabeverfahrens durch die Zugabe von Asphaltgranulat das Ermüdungsverhalten vorteilhaft beeinflusst wird,
  - das Ermüdungsverhalten bei Verwendung eines Schlag-Rührmischers nicht zielsicher bestimmt werden und daher die Anwendung dieses Mischertyps zur Herstellung von Asphalt-Probekörpern mit Asphaltgranulat für Performance-Prüfungen nicht empfohlen wird.
- Die Analysen zur Lebensdauerprognose mittels rechnerischer Dimensionierung haben ergeben, dass
  - die Wahl des Gerätetyps des Labormischers von untergeordneter Bedeutung ist jedoch ausschließlich Zweiwellen-Zwangsmischer oder Gegenlauf-Zwangsmischer wahlweise eingesetzt werden sollten, da das Ermüdungsverhalten bei Verwendung eines Schlag-Rührmischers (SRM) mittels Spaltzug-Schwellprüfung nicht zielsicher bestimmt wer-

den und daher die Anwendung dieses Mischertyps zur Herstellung von Asphalt-Probekörpern mit Asphaltgranulat für Performance-Prüfungen nicht empfohlen werden kann.

- das untersuchte Zugabeverfahren (Warm- oder Kaltzugabe) die Gebrauchsdauer mittels rechnerischer Dimensionierung ausschließlich bei hohen Zugabeanteilen an Asphaltgranulat beeinflusst.

Es kann festgehalten werden, dass – nach einer ausreichend langen Nachmischzeit von mindestens 180 s – Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat im Labor praxisnah mittels Einsatzes eines Zweiwellen-Zwangsmischers oder eines Gegenlauf-Zwangsmischers hergestellt werden kann. Der Zweiwellen-Zwangsmischer ist gegenüber dem Gegenlauf-Zwangsmischer nach Möglichkeit vorzuziehen, weil dann Homogenitätsschwankungen im resultierenden Mischgut noch effizienter reduziert werden können.

Die empfohlene Vorgehensweise zur Herstellung und Verdichtung von mit Asphaltgranulat modifiziertem Asphaltmischgut im Labor wird zusammenfassend erläutert. Ausreichend lange Mischzeiten sind zu gewährleisten. Mit Hilfe der beschriebenen Vorgehensweise ist nach dem heutigen Stand des Wissens bestmöglich sichergestellt, dass die im Labor hergestellten Probekörper weitgehend vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen, wie das gleiche unter Praxisbedingungen in situ hergestellte und eingebaute Asphaltmischgut.

## Literatur

Di Benedetto, H., Partl, M.N., Francken, L., and De La Roche Saint André, C. 2001. Stiffness testing for bituminous mixtures. RILEM TC 182-PEB Performance testing and evaluation of bituminous materials, Materials and Structures, Vol. 34.

FGSV, 1994. Technische Prüfvorschrift, Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2007a. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 33, Verfahren zur Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2007b. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 35, Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2007c. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 8, Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2009a. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen. AL-SP – ASPHALT 09, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2009b. Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2009c. Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke RDO Asphalt 09. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2009d. Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB 09). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2010a. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 2, Korngrößenverteilung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2010b. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 25 A 2, Dynamischer Stempel-eindringversuch an Walzasphalt. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV, 2010c. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 6, Raumdichte von Asphaltprobekörpern. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

Findley, W.N., Lai, J.S., and Onaran, K. 1976. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 18, North-Holland Publishing Company, Amsterdam.

Francken, L., and Verstraeten, J. 1974. Methods for Predicting Moduli and Fatigue Laws of Bituminous Road Mixes under Repeated Bending. Transportation Research Record No. 515, pp. 114-123, Washington D.C.

Grönniger, J., Renken, P. und Wistuba, M. 2009. Verwendung von Fräsasphalt aus Offenporigen Asphaltdeckschichten auf möglichst hohem Wertschöpfungsniveau. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 07.0212/2006/CGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau-

und Stadtentwicklung, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Braunschweig.

Hürtgen, H. 2000. Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie). Schriftenreihe des Fachgebietes Konstruktiver Straßenbau im Institut für Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Heft 20, Hannover.

Kayser, S. 2007. Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse bei Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen. Dissertation, Technische Universität Dresden.

prEN 12697, 2011. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 46, Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen. Europäische Norm, Europäisches Komitee für Normung.

Renken, P. und Lobach, T. 2005. Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten. Schlussbericht, Forschungsprojekt FA 07.194/2001/CGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 908.

Renken, P. und Lobach, T. 2006. Einfluss der Zugabe von Ausbauasphalt ohne und mit PmB auf die Eigenschaften von Asphaltbindervarianten bei Verwendung von PmB 45. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 07.205/2003/BGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Ringleb, A. 2012. Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs. Diplomarbeit, erschienen in: Schriftenreihe Straßenwesen, 25, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Steinhoff, G., Eulitz, J. und Milbradt, H. 1986. Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen. Schlussbericht, AIF-Forschungsvorhaben Nr. 5699, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Wistuba, M., Monismith, C., Bahia, H.U., Renken, P., Olard, F., Blab, R., Mollenhauer, K., Metzker, K., Büchler, S., Grönniger, J., Zeng, M. und Nam, K. 2009. Asphaltverhalten bei tiefen Temperaturen. Schriftenreihe Straßenwesen, 23, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Wistuba, M. und Isailovic, I. 2014. Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisingerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 84.0106/2009 i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.